

空間依存反応度投入事象解析コード (EUREKA-ATR)の開発

1987年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

空間依存反応度投入事象解析コード (EUREKA-ATR)の開発

若林 利男^{*}, 速水 義孝^{*}

要 旨

(目的) ATRの反応度変化解析において、反応度フィードバック効果を時間的、空間的に正確に求めるため、3次元反応度変化解析コード(EUREKA-ATR)を開発する。

(方法) 核熱結合一点近似動特性解析コード(EUREKA-2)と3次元拡散計算コード(CITATION)を基にして作成する。

(結果) 以下の特徴を持つ3次元反応度変化解析コード(EUREKA-ATR)が完成した。

- (1) EUREKA-2の熱流動モデルを採用しているため、急激な冷却材温度上昇やボイド発生がある反応度投入事象の解析が可能である。
- (2) 拡散計算として3次元モデルを採用しているため、制御棒引抜き事象解析が正確に行える。
- (3) 格子断面積がライブラリーとして外部ファイル化されており、各ゾーンへの断面積のセットが燃料温度、ボイド率等により自動的に行える。
- (4) 核計算において自動ゾーン割付け機能を有しているので取替炉心における反応度事故解析も容易に行える。

(結論) EUREKA-ATRコードの開発によってATRプラントの空間依存の反応度投入事象の解析が精度良く、かつ容易に行えるようになり、「ふげん」及び実証炉の安全審査対応に使用していける。

April, 1987

Development of Space-Dependent Kinetic Code (EUREKA-ATR)
for Reactivity Accident Analysis

Toshio Wakabayashi* and
Yoshitaka Hayamizu*

Abstract

A quasi steady state, multi-dimensional, space-dependent, kinetic code EUREKA-ATR which is coupled with multi-region thermal-hydraulic model has been developed to analyze neutronic, thermal and hydrodynamic transient behaviors in a heavy-water-moderated, light-water-cooled, pressure-tube-type reactor (ATR).

The code is based on EUREKA-2 developed by JAERI and CITATION.

The code includes the following features:

- (1) EUREKA-ATR can analyze the reactivity accidents with quick increase of temperature or vapor of coolant.
- (2) This code can analyze accurately the transient response of the core against the reactivity change caused by control rod withdrawal.
- (3) The power and flux distributions of the core are calculated with 2-group, 3-dimensional diffusion equations, using the libraries of cell constants dependent on temperature and void fraction.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. 概 要	1
2. コードの改良・整備	2
2.1 EUREKA-2 の改良	2
2.1.1 初期計算	2
2.1.2 過渡計算	2
2.1.3 入出力	3
2.1.4 プログラム・フローチャート	4
2.2 EUREKA-SPACE の改良	12
2.2.1 初期計算ブロック	12
2.2.2 拡散計算ブロック	15
2.2.3 実証炉体系	20
2.3 格子定数ライブラリの作成	22
2.4 EUREKA-ATR の開発	29
3. 検証計算	31
3.1 検証計算データの作成	31
3.2 検証計算結果の検討	40
4. 結 論	61
5. 今後の検討	61
謝 辞	63
参考文献	64
付 録 空間分布プロット図	65

1. 概 要

「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」改正において、反応度フィードバック計算を行う場合、反応度フィードバック効果の時間的・空間的变化を考慮することが要求されている。実証炉の反応度変化解析（特に起動時制御棒引抜き）において反応度フィードバック効果を時間的、空間的に正確に求めるためには3次元反応度変化解析コードが必要となる。

今までは核熱結合の一点近似動特性コード EUREKA-2^{1),2)} を用いて実証炉の起動時制御棒引抜き過渡事象の感度解析を実施し、実証炉への適応性の確認を行ってきた。今後は、前述の背景に基づき、空間依存を考慮できる EUREKA-SPACE の改良・整備を行い、実証炉用計算モデルの作成及び感度解析を実施し、安全審査等のために備えていかなければならない。

本報告書はその第一段階として、EUREKA-SPACE の改良・整備と改良後のコードによる機能チェック計算結果について記したものである。その概要は以下のとおりである。

(1) EUREKA-SPACE³⁾ の改良・整備

EUREKA-SPACE の熱流動部分は EUREKA-1⁴⁾ をベースにしたモデルが組込まれている。しかし、EUREKA-1 は冷却材にボイドが発生した場合、数値計算上不安定が生じる恐れがある。実証炉の反応度事故を解析する時にはボイドが取扱えることは不可欠である。従って、冷却材ボイドを安定して解析できる EUREKA-2 の熱流動部分を EUREKA-SPACE に組込んだ。

(2) ATR 実証炉用定数の整備

ATR 実証炉体系解析に必要な定数の整備を行った。

(3) 図形出力機能の整備

空間的な挙動を把握するには図形出力は必須である。EUREKA-SPACE はこの機能を持っていないので新たに付加した。

(4) 機能チェック計算

改良後のコードで機能動作の確認計算を行った。又、空間依存の効果を確認するために EUREKA-2 との比較計算も行った。

尚、改良後の EUREKA-SPACE を、「EUREKA-ATR」と称する。

2. コードの改良・整備

EUREKA-SPACE は 1977 年 8 月、日本原子力研究所で開発された準静的多次元空間依存炉心動特性解析コードである。その内容は炉心一点近似動特性解析コードである EUREKA-1 と多群多次元拡散コード CITATION を結合したものである。このコードの欠点として、①冷却材にボイドが発生した場合、流動計算部分に数値解析上の不安定が生じる恐れがある事、②入力データの様式が EUREKA-1, CITATION のままであり、パラメータサーベイ等を行うためにはデータの作成がかなり繁雑である事が挙げられる。従って、ここでのコードの改良・整備は冷却材ボイドを安定して解析できる EUREKA-2 の熱流動部分の EUREKA-SPACE への組み込み、入力様式の簡略化を実施した。又、格子断面積データについても外部ファイルにテーブル形式で保存し、必要に応じて自動的に取出せるよう整備した。以下に改良・整備の内容について示す。

2.1 EUREKA-2 の改良

既存の EUREKA-2 コードは、空間出力分布（径方向及び軸方向出力分布）と各フィードバック反応度の重み因子を入力データとして読み取り、それらは過渡期間において一定として取扱っている。本修正は過渡期間における状態量の変化に伴う空間出力分布及び重み因子の変化を考慮できるようコードの改良・整備を行うものである。

2.1.1 初期計算

初期状態量（ボイド率、燃料温度等）を用いて EUREKA-SPACE による拡散計算を行い、空間出力分布及び各フィードバック反応度の重み因子をファイル（ユニット #37）に出力する。それらを EUREKA-2 で読み初期熱計算を実行する。この初期計算はサブルーチン SINITL で制御する。

2.1.2 過渡計算

過渡期間においては、EUREKA-2 より過渡状態量（ボイド率、燃料温度）をファイル（ユニット #36）に出力する。次に、EUREKA-SPACE がこれらのデータをファイルから読み取り、空間出力分布及び各フィードバック反応度の重み因子を計算する。これらの値は次に拡散計算が実行されるまで EUREKA-2 では一定として扱い、一点近似動特性モデルによる炉出力及び熱水力計算を行う。空間分布を得るための拡散計算の実行条件としては以下に示す 3 つの条件があり、これらの中で 1 つでも満足したら空間分布計算を行う。この条件の判断、拡散計算を行う EUREKA-SPACE の呼出しは EUREKA-2 が制御する。

(1) 時 刻

指定した時刻を経過した直後に拡散計算を実行する。この時刻は入力データにより指定する。

(2) 燃料温度変化幅

前回の空間分布計算時の温度分布と、現在の温度分布との差の絶対値の最大値が、入力データにより指定された温度変化幅を越えた時拡散計算を実行する。

(3) 炉出力変化割合

前回の空間分布計算時の炉出力と、現在の炉出力との比が入力データにより指定された変化割合いを越えた時拡散計算を実行する。

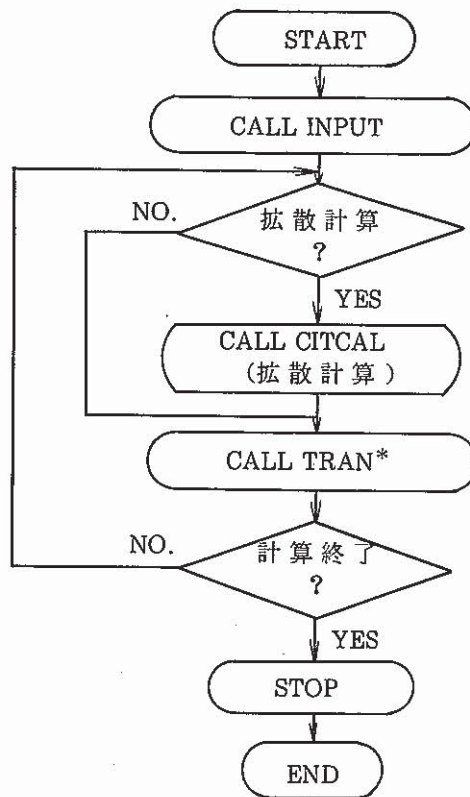
これら、過渡計算の制御は EUREKA-2 の中の Main ルーチン、サブルーチン TRANで行う。

2.1.3 入 出 力

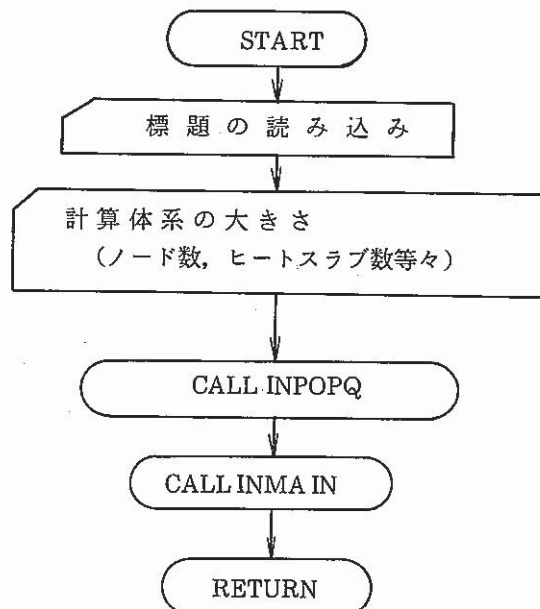
従来、EUREKA-2 で必要としていた空間出力分布及び各フィードバック反応度の重み因子に関する入力データは、EUREKA-SPACE との結合により不要となる。尚、EUREKA-2 と EUREKA-SPACE とのデータの受渡しはファイルを介して行う。

2.1.4 プログラム・フローチャート

1. MAIN

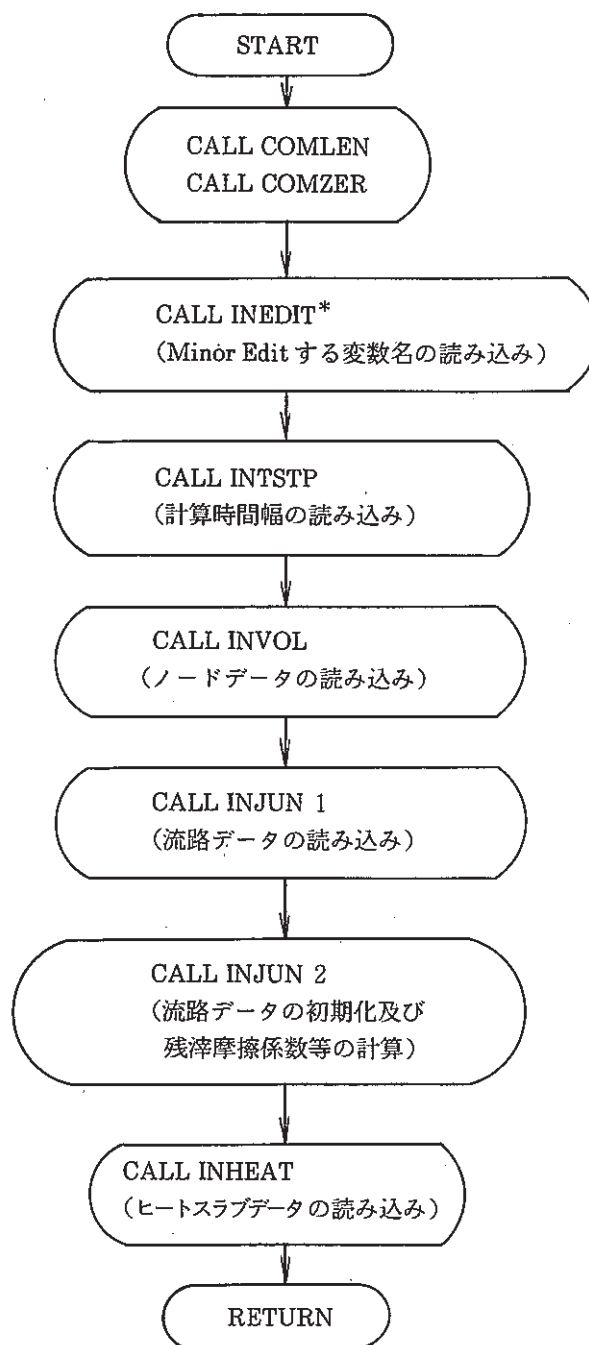


2. INPUT



* 改良を行ったルーチン

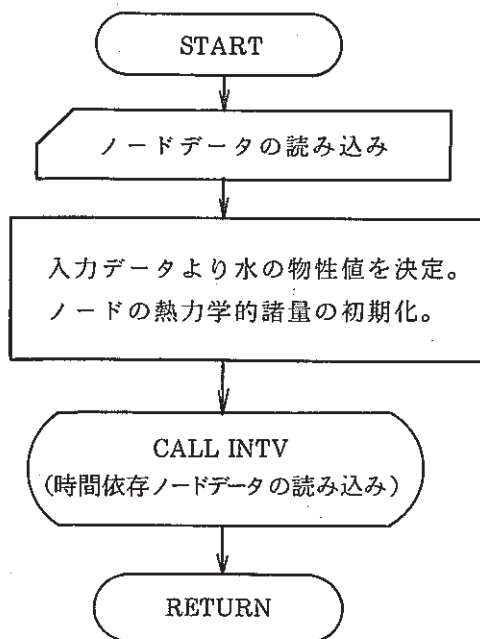
3. INMAIN



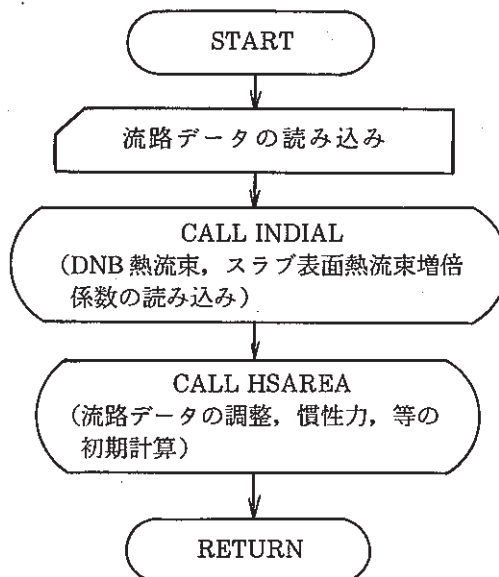
(註) COMLEN, COMZER では、コモンブロック長を決定し
エリアを確保する。

* 改良を行ったルーチン

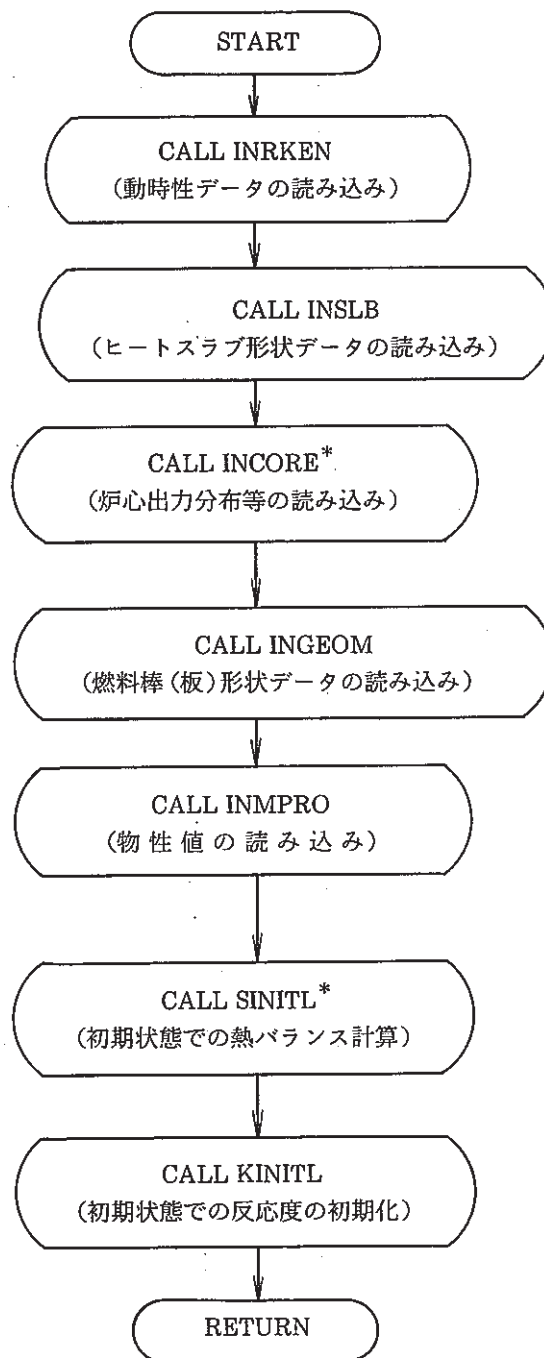
4. INVOL



5. INJUN 1

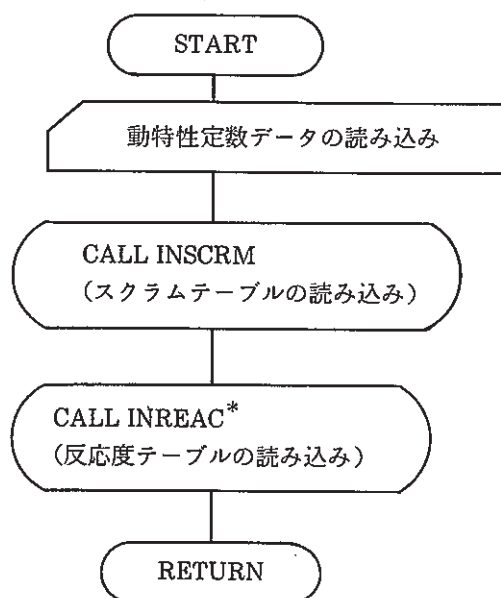


6. INHEAT

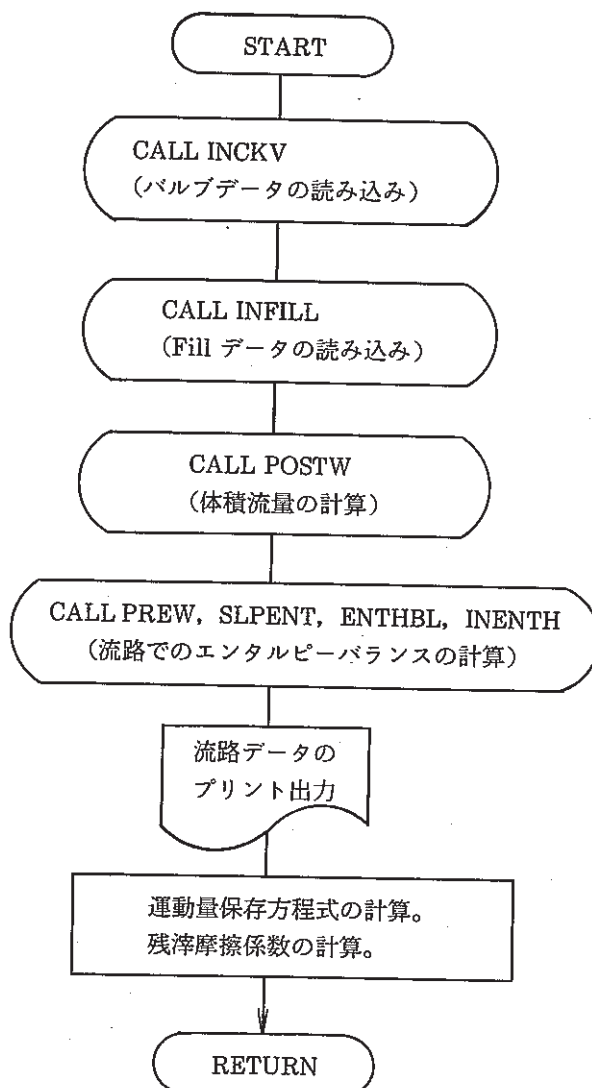


* 改良を行ったルーチン

7. INRKEN

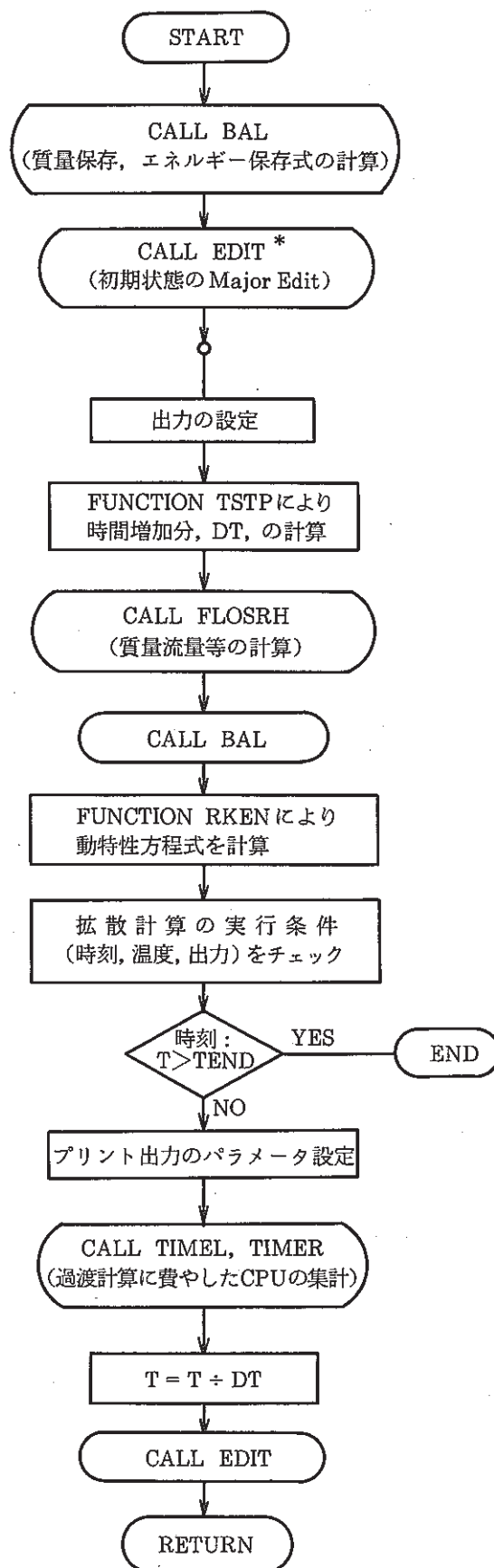


8. INJUN 2



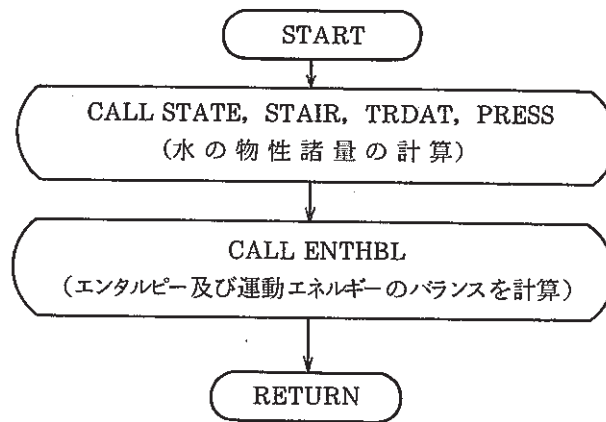
* 改良を行ったルーチン

9. TRAN

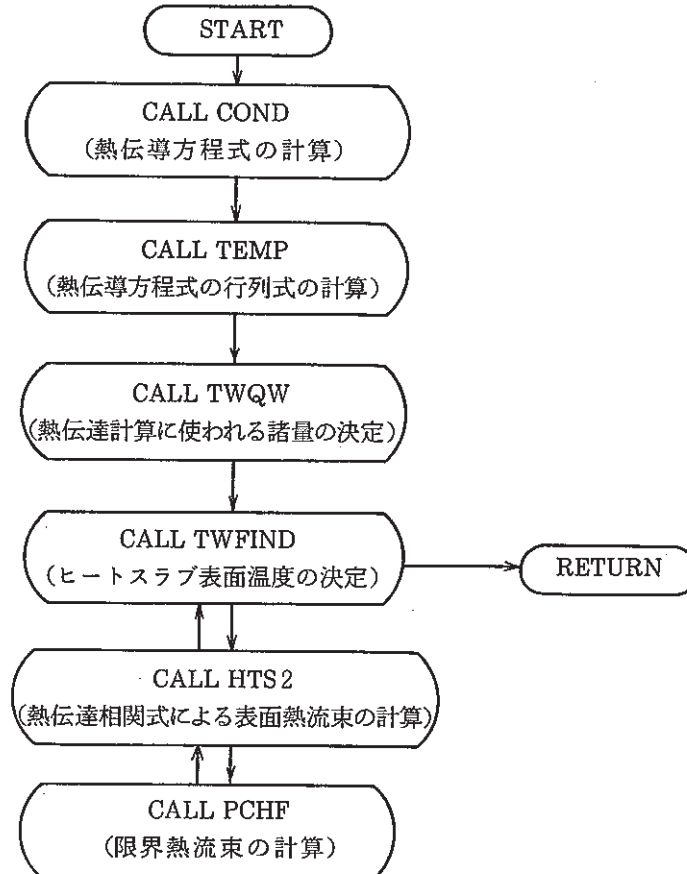


* 改良を行ったルーチン

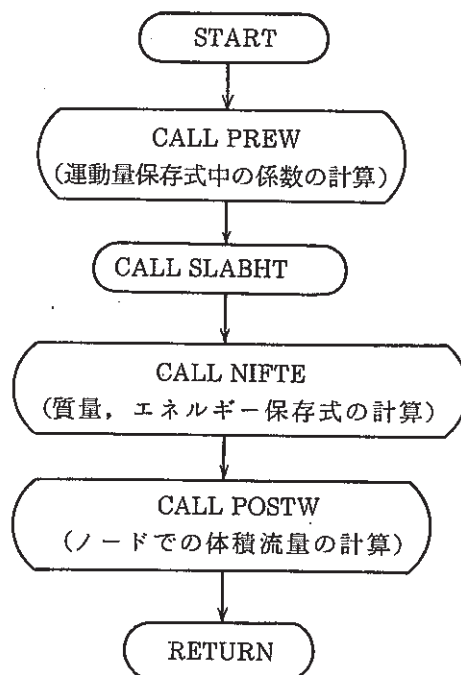
10. BAL



11. SLABHT



12. FROSRH



13. COND



2.2 EUREKA-SPACEの改良

前節で述べたように、EUREKA-ATRの全体のコントロールはEUREKA-2部分が受持つ事になる。又、EUREKA-SPACEについてはその熱流動部分をEUREKA-2に移したことにより空間分布計算のみを行うことになる。従って、EUREKA-2とEUREKA-SPACE各々の役割は次のようになる。

(1) EUREKA-2 :

EUREKA-SPACEから空間的な出力分布とフィードバック反応度計算のための重み因子を受取り、炉心一点近似モデルにより炉出力を算出する。又、燃料温度分布、冷却材ボイド率分布を熱流動計算により求める。

(2) EUREKA-SPACE :

EUREKA-2より燃料温度分布、冷却材ボイド率分布を受取り、それらの値をもとに格子断面積を各計算ノードに割付け、拡散計算により出力分布を算出する。又、中性子束分布よりフィードバック反応度計算のための重み因子を求める。

EUREKA-SPACE改良に対するその主な方針は次の通りである。

- ① ATR実証炉の構造をプログラム内に保持する事により入力データ量の削減を計る。又、CITATION入力データのジェネレータを用意し、容易に感度計算等のパラメータサーベイを行えるよう対処する。
- ② CITATIONにおけるゾーンの設定を自動化する。
- ③ 格子断面積をテーブル化されたライブラリとして用意しておき、ゾーン設定パラメータによる直線内挿で各ゾーンに割りつける。
- ④ 拡散計算のモデルとしては、計算時間等の理由により2群、粗メッシュとする。又、当初は3次元1/4回転対象炉心のみを与える。

以下に、改良点の詳細について述べる。

2.2.1 初期計算ブロック

まず初期計算のブロック図を図2.2.1に示す。このブロックは計算の最初に一度だけ呼ばれる。ここではこのブロックの中での主な機能について記す。

(1) 既定値のセット

既定値としてプログラム内にセットされている値の主なものは以下の通りである。

- a) ATR実証炉構造データ、メッシュデータ等
- b) オプション、炉心初期値（ボロン濃度、燃料温度及び冷却材ボイド率）
- c) 初装荷燃料配置（反射体等も含む）
- d) 燃焼度分布（0MWd/t がセットされている）
- e) 拡散計算実行条件（過渡期間、拡散計算は実行しない条件がセットされている）

- f) 核熱メッシュ対応データ（中心制御棒引抜き事象を想定したメッシュ対応データがセットされている）
- g) 制御棒関連データ（制御棒位置，種類等）
- h) CITATION 計算のための境界条件等
- i) その他

(2) 初期データファイル

EUREKA-2 と EUREKA-SPACE とはファイルを介して結合される。それらのファイルの内，初期データ授受のためのファイルについて記す。尚，これらファイルの様式についてはマニュアル⁵⁾に記載してある。

a) EUREKA-2 から EUREKA-SPACE へ

このファイル（ユニット #43）はこの初期計算ブロックが呼ばれる前に EUREKA-2 で準備される。その内容はケースのタイトル，各ヒートスラブ，冷却材のボリューム及び初期出力である。

b) EUREKA-SPACE から EUREKA-2 へ

このファイル（ユニット #44）には空間分布を計算するための条件が書かれる。それらは指定した時刻，燃料温度変化幅及び炉出力変化割合である。又，熱計算メッシュにおけるチャンネル数と各チャンネル出入口のヒートスラブ番号も書かれる。

(3) 核熱計算メッシュ対応

核計算のメッシュは既に記したように 3 次元粗メッシュを採用している。一方，熱計算メッシュは EUREKA-2 の制限条件より 5 チャンネル，各チャンネル 9 ノードである。そのため，メッシュの対応は，複数の核計算メッシュを一つの熱計算メッシュに割り当てることになる。軸方向は核計算では 15 ノード，熱計算では 9 ノードであり，それらの対応は入力データで変更可能ではあるが，基本的な対応を既定値としてプログラム内にセットしており，対応図は 2.2.3 項に示してある。平面（チャンネル）の対応は取扱う事象（例えば引抜き制御棒位置）により異なるので，その都度入力データで設定する必要がある。

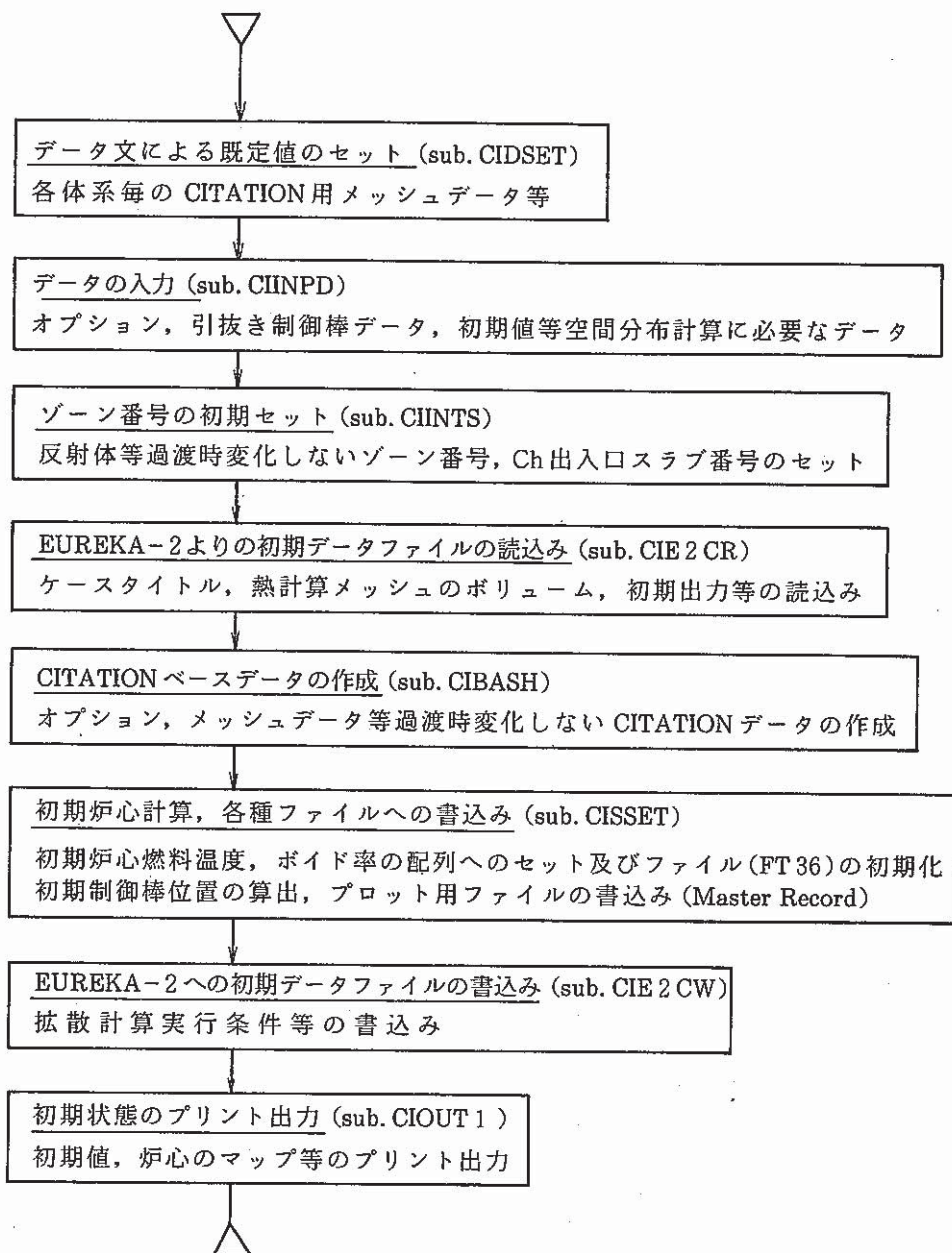


図 2.2.1 初期計算ブロック図 (sub. CITINT)

2.2.2 拡散計算ブロック

図 2.2.2 に拡散計算のブロック図を示す。このブロックの機能は EUREKA-2 より燃料温度、ボイド率各分布を受取り、制御棒位置等もパラメータとして各ゾーンへ格子断面積を割りつける。この断面積をもとにして CITATION により拡散計算を行う。拡散計算の結果として得られる出力分布、中性子束分布より熱計算メッシュに対応する出力分布、重み因子分布を算出し、EUREKA-2 にファイルを介して渡すものである。

このブロックは初期値設定のためにまず EUREKA-ATR 全体のコントロールを司る EUREKA-2 から呼出される。この場合の燃料温度、ボイド率は入力で指定したものを用いる。初期値として得られた出力分布、重み因子分布は EUREKA-2 に渡され、それを使用して疑似過渡計算が開始される。本来の過渡計算における拡散計算は、別途入力で指定した拡散計算実行条件を満足したとき EUREKA-2 から呼出される。つまり、次に拡散計算実行条件を満足するまではその直前に計算された出力分布、重み因子分布が継続して EUREKA-2 で使われることになる。以下にこのブロックの中での主な機能等について示す。

(1) 拡散計算実行条件

拡散計算実行条件とは EUREKA-ATR をコントロールしている EUREKA-2 が、拡散計算ブロックを呼出するための判断基準値であり、その呼出しは一点近似動特性、熱流動各モデルを解くことにより得られる結果と実行条件とを比較することにより決定される。EUREKA-ATR では拡散計算実行条件として以下に掲げる 3 種類が用意されており、いずれも入力データで指定できる。

a) 過渡時刻による指定

拡散計算の実行を過渡時刻で明確に指定する。最大 10 個まで指定可能である。

b) 燃料温度変化幅による指定

前回拡散計算実行時の燃料温度分布と、現在の同分布との差の空間内最大値が指定した燃料温度変化幅を超えた場合、拡散計算を実行する。

c) 炉出力変化割合による指定

前回拡散計算実行時の炉出力と、現在の同値との比が指定した炉出力変化割合を超えた場合、拡散計算を実行する。この方法による指定は出力上昇時と同下降時の 2 種類が用意されている。

以上掲げた 3 種類の拡散計算実行条件の指定方法が EUREKA-ATR では準備されているが、拡散計算はこれらのうち一つでも条件を満足したら実行される。尚、初期分布計算は自動的に行われるのでここで指定する必要はない。

(2) 過渡データファイル

EUREKA-2 と EUREKA-SPACE とはファイルを介して結合されることは既に示した。それらのファイルの内、ここでは過渡データ授受のためのファイルについて述べる。尚、これらのファイルの様式についてはマニュアルに記載してある。

a) EUREKA-2 から EUREKA-SPACE へ

このファイル（ユニット #36）は EUREKA-2 の中で拡散計算を実行しなければならないと判断した時、拡散計算ブロックを呼出す直前に最新の状態に更新される。その内容は、過渡時刻、熱計算メッシュにおける燃料温度とボイド率、炉出力、前項に記した拡散計算実行条件に関する情報等である。

b) EUREKA-SPACE から EUREKA-2 へ

このファイル（ユニット #37）は拡散計算が終了し、拡散計算ブロックから EUREKA-2 に戻る直前に最新の状態に更新される。その内容は熱計算メッシュに対応した出力分布及びドップラー、ボイド、冷却材温度各反応度に対する重み因子分布である。

(3) 制御棒の取扱い

EUREKA-ATRにおける制御棒の取扱いは、過渡期間その挿入位置が変化しないもの（以下「通常 CR」という）と過渡期間で引抜かれるもの（以下「異常 CR」という）の2種類に分けられている。後者については制御棒 ID 番号と各時刻に対する挿入位置をテーブル形式で与え、テーブル内のデータ間は直線内挿で当該時刻の挿入位置を求める。更に、異常 CR については制御棒反応度を調整するために、熱群の Σa を補正する係数の入力も準備してある。尚、実証炉においては出力平坦化制御棒（B4C）と出力調整用制御棒（SUS）の2種類があるが、それらの区別は制御棒 ID 番号に対応してプログラム内にセットされている。

(4) 自動ゾーン決定方法

ゾーンとは異なった格子断面積が割りつけられる最小単位である。EUREKA-ATR ではこの格子断面積を決定するパラメータとして以下のものを考えている。

- a) 燃 焼 度
- b) 燃料温度
- c) 冷却材ボイド率
- d) 重水中のボロン濃度

これらの中でボロン濃度は炉心内均一としているので問題はないが、それ以外のパラメータは炉心内に分布しているのでそれらを正確に取扱おうとすると膨大なゾーンを用意しなければならない（因みに実証炉 3 次元 1/4 炉心と考えた場合、最大 $162 \times 15 = 2430$ ゾーン必要）。しかし、拡散計算コードである CITATION はゾーン数として最大 200 までしか取扱うことができない。従って、EUREKA-ATR では以下に示す方法により自動的にゾーン数を最大 200 に納めるようゾーンをセットする。

- a) 上部反射体、下部反射体及び径方向反射体を各々 1 ゾーンとして登録する。
- b) 燃焼度、燃料温度及びボイド率について全拡散計算領域を調べ、それらの最大値と最小値を得る。
- c) 最大値と最小値より各パラメータの拡がりを求め、燃焼度については 1000 MWd/t ,

燃料温度については 10℃，ボイド率については 10% で各々の拡がりを分割する。

d) 全拡散計算領域について，3つのパラメータが分割されたどの範囲に入るかを調べる。

3つのパラメータの各範囲の組合わせが既にあればゾーン番号はその値とし，新たな組合わせが現われた場合は新しいゾーン番号として登録する。

e) d) の処理を燃料タイプが変わった場合，制御棒や防震板を含むメッシュの場合について繰返す（3つのパラメータの各範囲の組合わせが既にあっても燃料タイプが違っていたり，又燃料タイプが同じであっても制御棒を含んでいたりと新たなゾーンとして登録する必要がある）。

f) e) に示した処理の結果，ゾーン数が CITATION が許す最大値である 200 を超えた場合，c) で記した分割幅を増して d), e) の処理を行う。

(5) 格子断面積のセット

前項で設定された各ゾーンに対して，格子断面積を割りつける。格子断面積はテーブル化されたファイルとして準備されており，割りつけはゾーンの各パラメータの値で直線内外挿することにより行われる。更に，そのゾーンが制御棒や防震板を含んでいた場合，それに対応する係数で格子断面積を補正する。この補正係数はプログラム内にセットされている。格子断面積ファイル，制御棒補正係数，防震板補正係数の算出方法，用意されているパラメータ値については 2.3 節で述べる。

(6) 出力分布・重み因子分布の算出

拡散計算で得られる出力分布は拡散計算各メッシュでの出力密度である。これを EUREKA-2 における熱計算で利用するためには熱計算メッシュへの変換，規格化が必要である。その方法は以下の考え方による。

a) 熱計算メッシュに含まれる各拡散計算メッシュでの出力密度を体積重みで平均し，熱計算メッシュ毎の出力密度分布を算出する。

b) それらを該当する燃料ヒートスラブの体積で重みづけし，更に総和が 1.0 になるように規格化する。

ここで，燃料ヒートスラブの体積は 2.2.1(2) 項に記した初期データファイル（ユニット # 43）に書かれているものである。

次にフィードバック反応度を算出するための重み因子について示す。重み因子は EUREKA-2 ではドップラー，ボイド，冷却材温度各反応度に関するものが必要であり，これらの値は拡散計算で得られる高速群，熱群の中性子束分布より求められる。その方法を以下に示す。

まず，各変数の意味は次のとおりである。

拡散計算メッシュにおける高速中性子束：	ϕ_{ijk}^F
拡散計算メッシュにおける熱中性子束：	ϕ_{ijk}^T
拡散計算メッシュにおける体積：	ΔV_{ijk}

熱計算メッシュにおけるドップラー反応度に関する重み因子 : $\phi_{D,lm}^2$

熱計算メッシュにおけるボイド反応度に関する重み因子 : $\phi_{V,lm}^2$

熱計算メッシュにおける冷却材温度反応度に関する重み因子 : $\phi_{C,lm}^2$

熱計算メッシュにおける体積 : ΔV_{lm}

また、各メッシュの体積は以下のように保存されているとする。

$$\Delta V_{lm} = \sum_{ijk}^{lm} \Delta V_{ijk} \quad (2.2.1)$$

ここで、 $\sum_{ijk}^{lm}$ は熱計算メッシュ (l, m) に含まれる拡散計算メッシュ (i, j, k) の和である。以上より各重み因子は次式で定義される。

$$\phi_{D,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} = \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{F^2} \cdot f_D^F \cdot \Delta V_{ijk} + \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{T^2} \cdot f_D^T \cdot \Delta V_{ijk} \quad (2.2.2)$$

$$\phi_{V,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} = \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{F^2} \cdot f_V^F \cdot \Delta V_{ijk} + \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{T^2} \cdot f_V^T \cdot \Delta V_{ijk} \quad (2.2.3)$$

$$\phi_{C,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} = \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{F^2} \cdot f_C^F \cdot \Delta V_{ijk} + \sum_{ijk}^{lm} \phi_{ijk}^{T^2} \cdot f_C^T \cdot \Delta V_{ijk} \quad (2.2.4)$$

ここで、 $f_D^F, f_D^T, \dots$ は各反応度重み因子の高速群、熱群に寄与する割合である。但し、現在は f_D^F, f_V^T, f_C^T を 1.0 とし、他は 0.0 としている。最終的に EUREKA-2 に渡す重み因子は体積で重みづけし、更に総和が 1.0 になるよう規格化したものである。それらは次式で表現できる。

$$W_{D,lm} = \phi_{D,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} / \sum_{lm} \phi_{D,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} \quad (2.2.5)$$

$$W_{V,lm} = \phi_{V,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} / \sum_{lm} \phi_{V,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} \quad (2.2.6)$$

$$W_{C,lm} = \phi_{C,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} / \sum_{lm} \phi_{C,lm}^2 \cdot \Delta V_{lm} \quad (2.2.7)$$

ここで、 $W_{D,lm}, W_{V,lm}, W_{C,lm}$ が EUREKA-2 で使用するドップラー、ボイド、冷却材温度各反応度重み因子である。

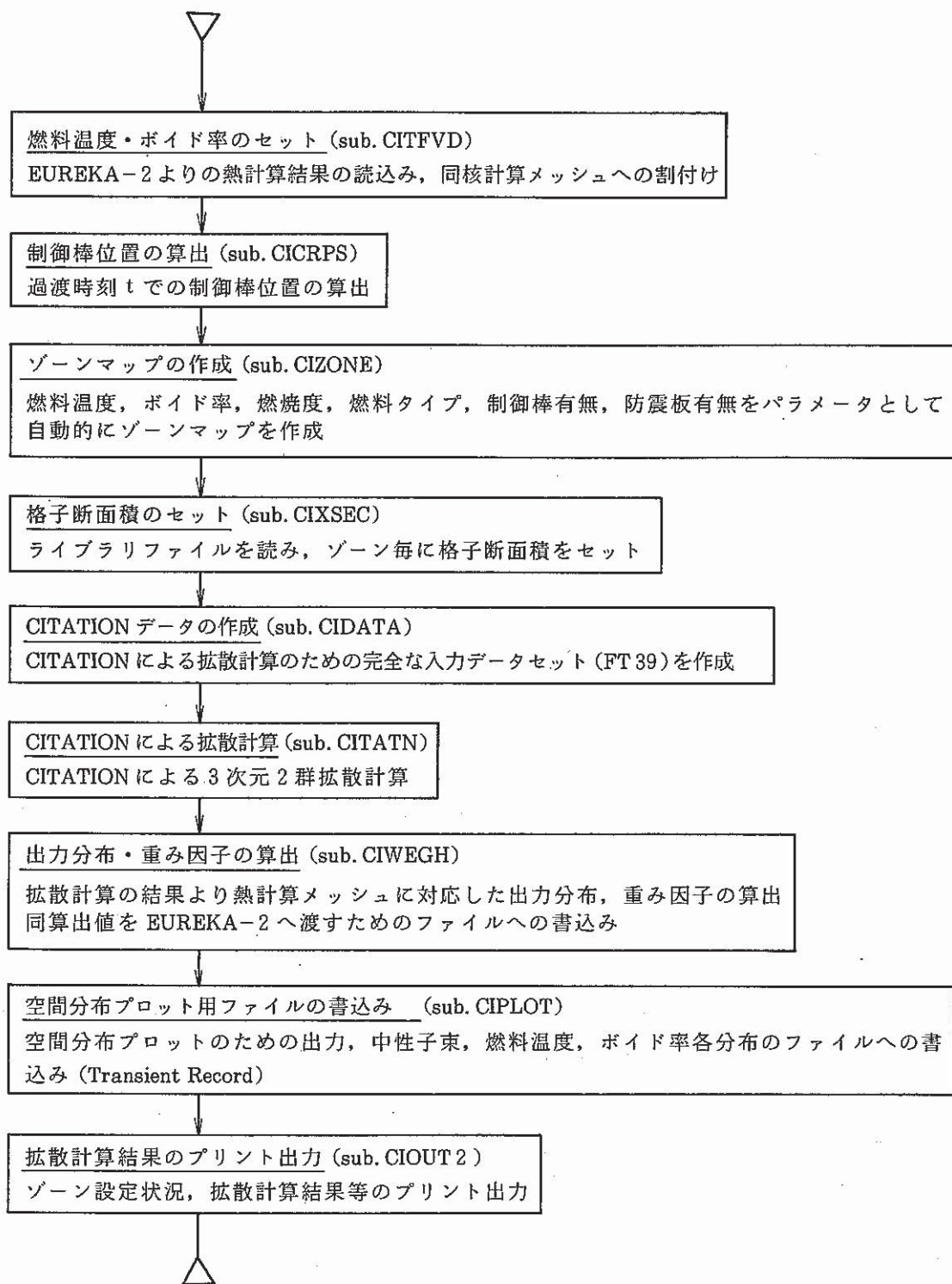


図 2.2.2 拡散計算ブロック図 (sub. CITCAL)

2.2.3 実証炉体系

EUREKA-ATR は ATR 実証炉における制御棒引抜き等の過渡事象を解析するコードである。そのため、コード内に実証炉の体系を保持している。図 2.2.3 に実証炉のメッシュ図を示す。この図は $x-y-z$ の 3 次元 1/4 回転対称炉心モデルである。平面図において○印は制御棒の位置を示しており、その中の数字は入力データ等で使用する制御棒 ID 番号である。又、立面図には軸方向の核熱メッシュ対応を示してある。核計算平面と熱計算チャンネルの対応は先に述べたように制御棒挿入位置、燃料の配置や燃焼度等の炉心状態によって変更する必要があるのでここには示していない。尚、現在 EUREKA-ATR この図に示した 3 次元 1/4 回転対称炉心モデルしか取扱えない。

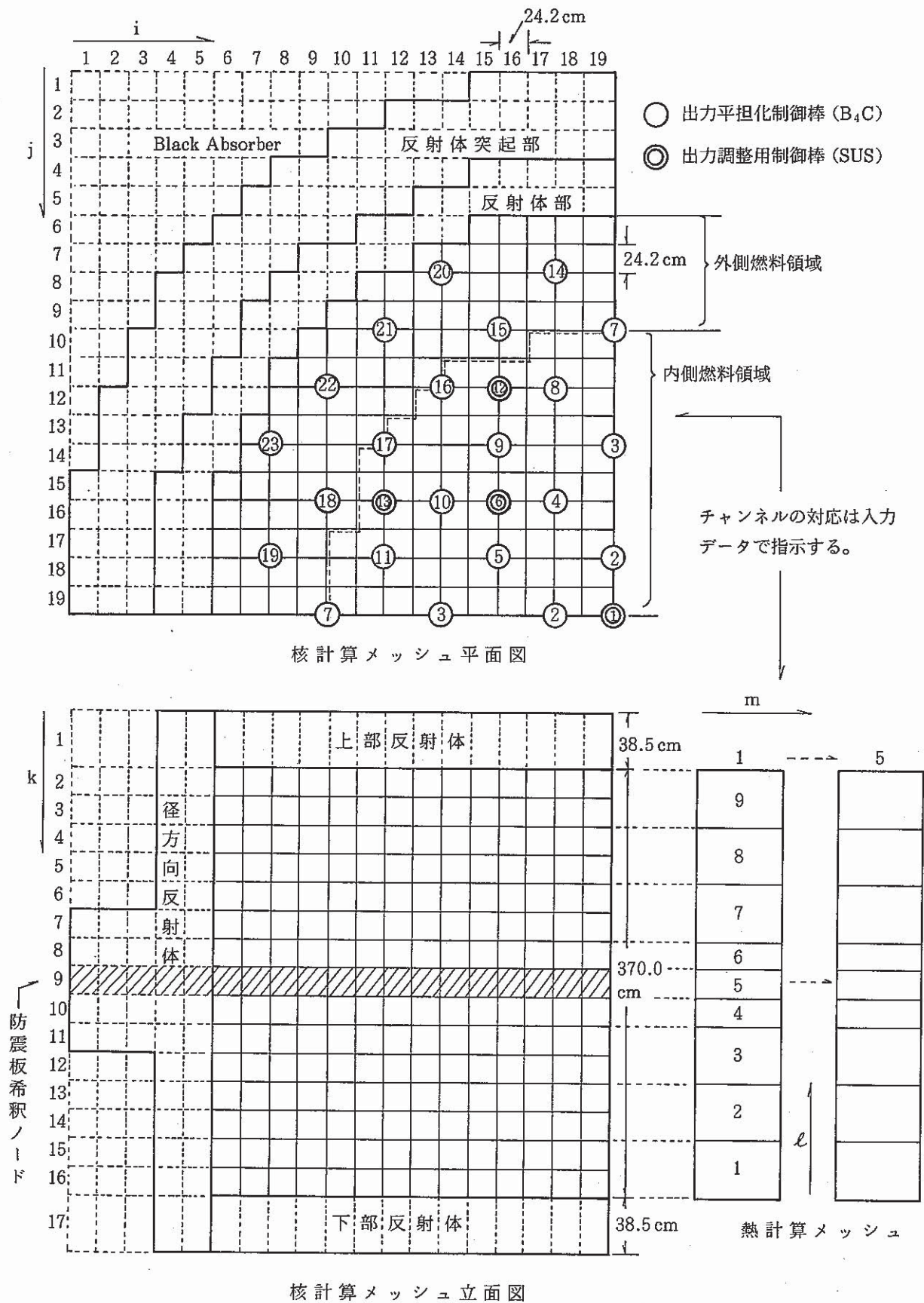


図 2.2.3 実証炉メッシュ図 (X-Y-Z の 3 次元 1/4 回転対称)

2.3 格子定数ライブラリの作成

ここでは、以下に掲げる核定数の計算条件およびそれらの結果の一部について示す。

- (1) 燃料格子
- (2) 上部反射体
- (3) 下部反射体
- (4) 径方向反射体
- (5) 制御棒補正定数
- (6) 防震板補正定数

これらの内、(1)～(4)についてはテーブル形式でライブラリファイル化されており、(5)及び(6)については補正定数がプログラム内にセットされている。ライブラリファイルの様式についてはマニュアルに記してあるのでここでは省略する。

尚、今回準備した格子定数は燃焼度 0 MWd/t の高温待機状態についてのみである。高温待機状態の取扱いは、燃料格子各領域の温度を圧力管から内側を全て 280 °C に設定し、他は定格条件の値を使用することとした。

(1) 燃料格子

燃料の格子定数計算条件を表 2.3.1 に、密度および組成を表 2.3.2 に示す。又、その結果得られた K_{∞} を表 2.3.3 に示す。

(2) 反 射 体

反射体の格子定数としては上部・下部反射体及び径方向の重水反射体の 3 種類準備する。径方向反射体については前項に記した燃料格子定数計算の結果の内、格子の重水領域の定数をそのまま用いた。その場合の表 2.3.1 に示した作成条件の内、燃料タイプは初装荷外側、ボイド率は 40%、燃料温度は 500 °C を採用した。これらの反射体の格子定数を表 2.3.4 に示す。

表 2.3.1 燃料格子定数作成条件

計算コード	WIMS-ATR ^{6), 7)}
燃料タイプ	初装荷内側燃料 (1.9/1.9/0.9) wt% Pu (f) 初装荷外側燃料 (1.7/1.7/1.3) wt% Pu (f)
ボロン濃度	10, 20 ppm
燃焼度	0 MWd/t
ボイド率	0, 20, 40, 60, 80 %
燃料温度	0, 500, 1000, 1500 °C
バックリング	10 ppm Br : 3.89E-5, Bz : 5.79E-5 20 ppm Br : 4.05E-5, Bz : 5.80E-5

表 2.3.2 燃料の密度および組成

	初装荷内側燃料		初装荷外側燃料	
	内・中間層	外 層	内・中間層	外 層
	1.9 wt % Pu (f)	0.9 wt % Pu (f)	1.7 wt % Pu (f)	1.3 wt % Pu (f)
密度 (g/cc)	9.83603	9.83448	9.83603	9.83448
U-235	0.610219	0.618917	0.611959	0.615438
U-238	85.215284	86.439923	85.458214	85.944071
組 成 Pu-239	1.349211	0.639093	1.207186	0.923138
(wt %) Pu-240	0.558294	0.264452	0.499525	0.381988
Pu-241	0.325672	0.154264	0.291390	0.222826
Pu-242	0.093049	0.044075	0.083254	0.063665
O-16	11.848270	11.849275	11.848471	11.848873

表 2.3.3 燃料格子の無限増倍率

〔初装荷内側燃料 (1.9/1.9/0.9) wt% Pu (f)〕

ボロン濃度 (ppm)	ボイド率 (%)	燃 料 温 度 (°C)			
		0	500	1000	1500
10	0	1.168346	1.153650	1.143016	1.134287
	20	1.169361	1.154382	1.143521	1.134633
	40	1.171367	1.156127	1.145113	1.136087
	60	1.175230	1.159830	1.148753	1.139665
	80	1.182713	1.167226	1.156149	1.147040
20	0	1.076018	1.062110	1.052074	1.043852
	20	1.075571	1.061560	1.051401	1.043084
	40	1.076657	1.062466	1.052217	1.043833
	60	1.080040	1.065773	1.055512	1.047098
	80	1.087587	1.073292	1.063075	1.054683

〔初装荷外側燃料 (1.7/1.7/1.3) wt% Pu (f)〕

ボロン濃度 (ppm)	ボイド率 (%)	燃 料 温 度 (°C)			
		0	500	1000	1500
10	0	1.191028	1.176011	1.165059	1.156088
	20	1.190894	1.175569	1.164436	1.155295
	40	1.191617	1.176050	1.164760	1.155499
	60	1.194084	1.178375	1.167044	1.157734
	80	1.200015	1.184267	1.172962	1.163662
20	0	1.100205	1.086058	1.075739	1.067286
	20	1.098859	1.084514	1.074080	1.065526
	40	1.098779	1.084265	1.073750	1.065131
	60	1.100852	1.086281	1.075768	1.067143
	80	1.106887	1.092327	1.081892	1.073313

表 2.3.4 反射体の格子定数

	上部反射体	下部反射体	径 方 向 反 射 体	
			$^{10}\text{B}=10\text{ppm}$	$^{10}\text{B}=20\text{ppm}$
D^F	1.32752	1.37240	1.33023	1.32997
D^T	0.428732	0.442203	0.878011	0.879405
Σ_a^F	2.00807 E-4	2.63213 E-4	4.02709 E-5	9.81946 E-5
Σ_a^T	1.26006 E-1	1.22697 E-1	1.86815 E-3	3.58645 E-3
Σ_r	1.80973 E-3	1.60669 E-3	9.18534 E-3	9.14764 E-3

(3) 制御棒補正定数

制御棒補正定数は WIMS マルチセルモデルと CITATION 100 チャンネルモデルとを組合せることにより得る。その手順は以下の通りである。

- ① WIMS マルチセルモデルにより制御棒と隣接 4 チャンネル燃料格子の 2 群定数を求める。
- ② WIMS ユニットセルモデルにより通常燃料格子の 2 群定数を求める。これは(1)項に記した燃料格子定数計算と同じである。
- ③ これらの 2 群定数を用いて CITATION x-y 2 次元 100 チャンネルモデルにより制御棒挿入格子の核定数を算出する。
- ④ EUREKA-ATR における制御棒補正は PHLOX システム⁸⁾と同様に②で求めた通常燃料格子断面積と③で求めた制御棒挿入格子断面積の差を制御棒補正定数テーブルとして用意しておき、その差を用いて該当格子の通常燃料断面積を補正する。

表 2.3.5 に WIMS マルチセルモデル計算条件を、図 2.3.1 に CITATION x-y 2 次元 100 チャンネルモデル図を示す。尚、これにより得られた制御棒反応度を表 2.3.6 に示す。

(4) 防震板補正定数

防震板の補正定数は WIMS ユニットセルモデルにおける重水領域に防震板を希釈した計算により求める。EUREKA-ATR における防震板補正は制御棒補正と同様に、通常燃料格子断面積と防震板を希釈したモデルにより得られた格子断面積との差をテーブルとして用意しておき、その差を用いて該当格子の通常燃料断面積を補正する。表 2.3.7 に防震板補正定数計算条件を、表 2.3.8 に防震板を重水に希釈したときの組成を示す。

表 2.3.5 制御棒補正定数計算条件

計算コード	WIMS-ATR マルチセルモデル
燃料タイプ	B4C 制御棒に初装荷内側燃料を配置 SUS 制御棒に初装荷内側燃料を配置 B4C 制御棒に初装荷外側燃料を配置 SUS 制御棒に初装荷外側燃料を配置
ボロン濃度	10, 20 ppm
燃 焼 度	0 MWd/t
ボイド率	0, 40, 80 %
燃料温度	500 °C

②に示した WIMS ユニットセルモデルの計算条件は表 2.3.1 に掲げたものと同一である。

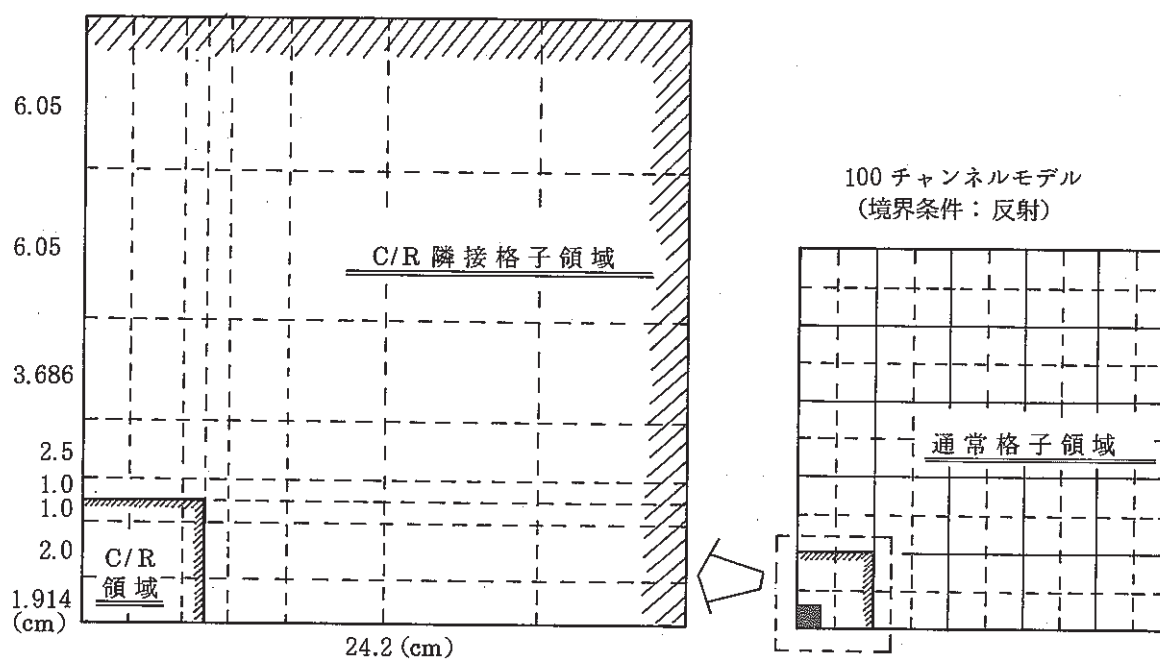


図 2.3.1 CITATION による制御棒補正定数計算モデル

表 2.3.6 制御棒反応度 ($\% \Delta k / k$)

ボロン濃度 (ppm)	ボイド率 (%)	B4C 制御棒		SUS 制御棒	
		初装荷内側	初装荷外側	初装荷内側	初装荷外側
10	0	9.639	9.225	4.534	4.319
	40	10.561	10.123	4.899	4.669
	80	11.487	11.050	5.216	4.993
20	0	8.826	8.474	3.875	3.696
	40	9.951	9.556	4.322	4.133
	80	11.134	10.718	4.782	4.585

ここで、制御棒反応度 ($\Delta \rho$) は次式で算出した。

$$\Delta \rho = \left[(k - k_{CR}) / (k \times k_{CR}) \right] \times 100$$

k : 通常燃料格子の k_{∞}

k_{CR} : 制御棒挿入格子の k_{∞}

表 2. 3. 7 防震板補正定数計算条件

計算コード	WIMS-ATR
燃料タイプ	初装荷外側燃料。但し，重水領域に防震板を希釈
ボロン濃度	10, 20 ppm
燃焼度	0 MWd/t
ボイド率	40 %
燃料温度	500 °C

表 2. 3. 8 防震板を重水に希釈したときの組成

		重 水	防震板	希釈後
密度 (g/cc)		1.085453	5.5378	1.50136
組 成 (wt%)	H-1	0.04028	0.00149	0.02669
	D	20.04085	0.73928	13.27951
	O-16	79.91887	2.94810	52.95601
	B-10	0.00100	0.00004	0.00066
		0.00200	0.00007	0.00132
	Zr	—	94.63	33.149
	Fe	—	0.13	0.046
	Ni	—	0.06	0.021
	Sn	—	1.39	0.487
	Cr	—	0.10	0.035
体積比		0.89865	0.10135	1.0

B-10の組成において上段は 10 ppm，下段は 20 ppmを示す。

2.4 EUREKA-ATRの開発

以上述べた EUREKA-2, EUREKA-SPACE の修正及び PHLOX システムの考えに基づいた格子断面積ライブラリファイルと内外挿ルーチンにより「EUREKA-ATR」コードが開発された。そのシステムフローチャートを図 2.4.1 に示す。EUREKA-2 と EUREKA-SPACE とはファイルを介して結合されるが、その様式はマニュアルに示してある。

又、この様な解析コードにおいては図形出力機能は必須である。EUREKA-ATR では時系列プロット機能として従来から EUREKA-2 が持つものに、取扱いデータを増加するなどして強化した。拡散計算で得られる空間分布のプロット機能については EUREKA-SPACE は有していないので今回新たに開発した。これらはいずれも EUREKA-ATR とは別プログラムとし、利用の便宜を計っている。図形出力機能についてもマニュアルに詳細を説明してある。

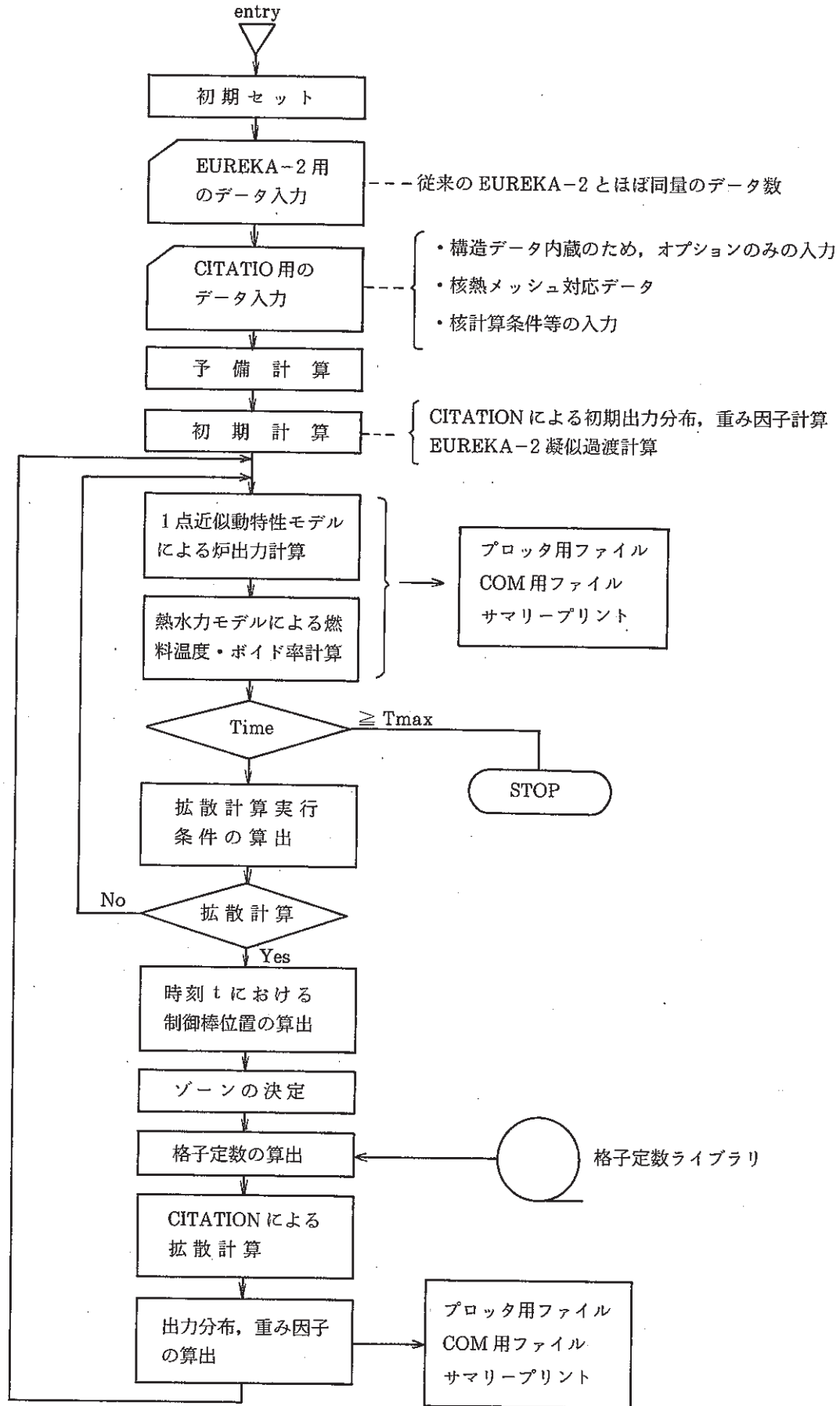


図 2.4.1 EUREKA-ATR のシステムフローチャート

3. 検 証 計 算

ここでは EUREKA-ATR の機能チェックのための検証計算について述べる。又、炉心一点近似特性解析コードである EUREKA-2 の結果とも比較検討した。

3.1 検証計算データの作成

検証計算は ATR 実証炉 3 次元 1/4 回転対称炉心による解析とし、その炉心構成図を図 3.3.1 に示す。これは高温待機状態からの起動制御棒引抜きを想定したものであり、引抜かれる制御棒は出力ピークチャンネル近傍の 1 本（全炉心では 4 本）を指定した。熱計算メッシュとの対応は引抜き制御棒位置を考えて、図に示す如くセットした。軸方向については 2.2.3 項に述べたとおりである（図 2.2.3 参照）。以下に具体的な検証データについて、一点近似動特性及び熱流動モデルを扱う EUREKA-2 のデータと、拡散計算を扱う EUREKA-SPACE のデータとに分けて示す。

(1) EUREKA-2 における検証データ

EUREKA-2 におけるチャンネル数分割は 5 とした（図 3.1.1 参照）。熱流動解析のための主なデータを表 3.1.1 ～ 3.1.8 に示す。又、動特性解析のための主なデータを表 3.1.4 ～ 3.1.6 に示す。

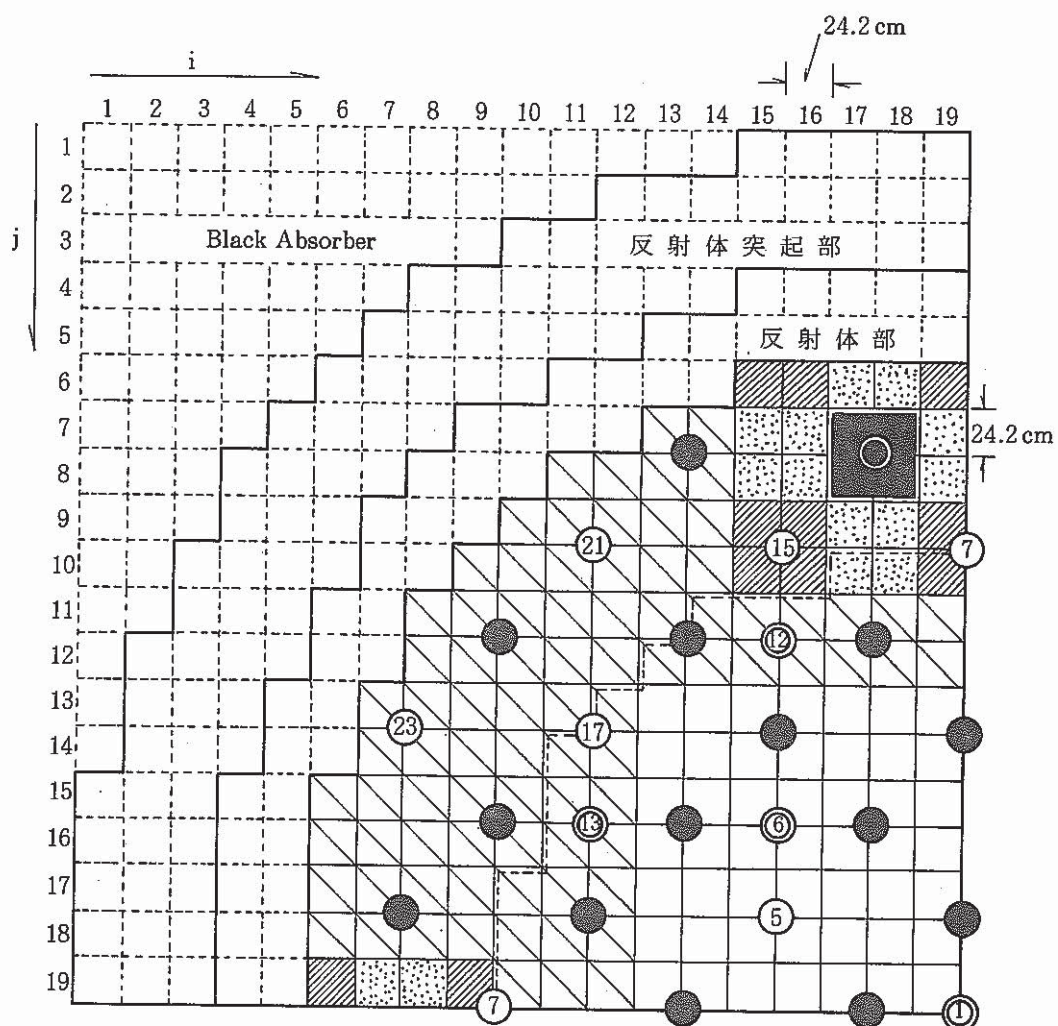
尚、表 3.1.7 に EUREKA-2 で必要な炉心運転条件を示す。

(2) EUREKA-ATR における検証データ

EUREKA-ATR において必要とする検証計算データを作成するためには炉心構成、拡散計算実行条件及び投入反応度を決定しなければならない。これらの内、炉心構成については図 3.1.1 に示した通りである。拡散計算の実行条件については十分な検討を行なう必要があるが、今回の検証計算においては精度をある程度保持するため、20 秒の過渡期間で 10 回前後の拡散計算が実行される条件を設定した。これらをまとめたものを表 3.1.8 に示す。

次に、投入反応度について述べる。一点近似動特性モデルに与えるこのデータとしては、表 3.1.5 に示したように $3.29 \times 10^{-4} \Delta k/sec$ で反応度を投入している。これは制御棒引抜き速度を 6cm/s とした値である。しかし、拡散計算により空間分布を計算する場合の投入反応度はこれとは別に考えなければならない。それは制御棒引抜き前後の炉心の固有値で決定される。従って、投入反応度を一点近似動特性モデルに与えるものと、拡散計算で与えられるものとは一致させる必要があり、そのためには事前に拡散計算により制御棒反応度をサーベイしておくなければならない。そのサーベイ計算について以下に示す。

EUREKA-2 による感度解析結果をみると約 14 秒でスクラムにより出力ピークが出現する。



- | | |
|---|-----------------------|
| ○ : 全引抜制御棒 (B_4C) | ■ : 熱計算チャンネル No.1 4体 |
| ◎ : 全引抜制御棒 (SUS) | ▤ : 熱計算チャンネル No.2 14体 |
| ● : 全挿入制御棒 (B_4C) | ▥ : 熱計算チャンネル No.3 11体 |
| ⊙ : 過渡時引抜かれる制御棒 (B_4C)
但し、初期は全挿入 | ▧ : 熱計算チャンネル No.4 84体 |
| | □ : 熱計算チャンネル No.5 49体 |
- 燃料集合体数
(1/4 炉心)

図 3.1.1 検証計算における炉心構成

表 3. 1. 1 燃料ペレット径方向出力分布

メッシュ No.	径方向位置 (mm)	相対出力分布
1	0.00	0.955
2	0.62	0.956
3	1.24	0.958
4	1.86	0.958
5	2.48	0.958
6	3.10	0.961
7	3.72	0.967
8	4.34	0.973
9	4.96	0.987
10	5.58	1.019
11	6.20	1.084

この値は (1.9/1.9/0.9) wt% Pu(f) 外層ペレットの
燃焼度 0 MWd/t のものである。

表 3. 1. 2 燃料ペレットの物性値

温 度 (°C)	熱伝導率 (kcal/m·h·°C)	熱 容 量 (kcal/m³·°C)	線膨脹係数 (1/°C)
100	23.452	659.34	9.767 E - 6
200	13.695	690.60	9.924 E - 6
300	9.676	718.37	1.008 E - 5
400	7.486	742.65	1.024 E - 5
500	6.112	763.44	1.040 E - 5
600	5.172	780.75	1.055 E - 5
700	4.491	794.57	1.071 E - 5
800	3.979	804.90	1.087 E - 5
900	3.583	811.75	1.102 E - 5
1000	3.270	815.10	1.118 E - 5
1100	3.021	823.64	1.134 E - 5
1200	2.820	832.18	1.149 E - 5
1300	2.659	840.71	1.165 E - 5
1400	2.530	849.25	1.181 E - 5
1500	2.429	857.78	1.197 E - 5
1600	2.351	866.32	1.212 E - 5
1700	2.294	874.86	1.228 E - 5
1800	2.256	883.39	1.244 E - 5
1900	2.235	891.93	1.259 E - 5
2000	2.230	900.47	1.275 E - 5

密度 $\rho = 10410 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

線膨脹率 $\alpha = 9.61\text{E}-6 + 1.57\text{E}-9 \text{ T (1/°C)}$

熱伝導率 $\kappa = 38.24 / (\text{T} + 40.24) + 6.125 \text{ E}-13 (\text{T} + 273)^3 \text{ (W/cm} \cdot \text{°C)}$

比熱 $C_p = 0.06 + 3.505 \text{ E}-5 \text{ T} - 1.675 \text{ E}-8 \text{ T}^2 \text{ [T} \leq 1000 \text{]}$

$C_p = 0.0701 + 8.2 \text{ E}-6 \text{ T (kcal/kg °C) [T} \leq 2000 \text{]}$

表 3.1.3 被覆管の物性値

温 度 (°C)	熱伝導率 (kcal/m·h·°C)	熱 容 量 (kcal/m³·°C)	線膨脹係数 (1/°C)
100	11.488	462.82	5.845 E-6
200	12.447	487.32	6.015 E-6
300	13.486	509.00	6.185 E-6
400	14.605	527.85	6.355 E-6
500	15.803	543.89	6.525 E-6
600	17.082	557.10	6.695 E-6
700	18.440	567.50	6.865 E-6
800	19.878	575.07	7.035 E-6
900	21.395	579.82	7.205 E-6
1000	22.993	581.75	7.375 E-6
1100	24.670	580.86	7.545 E-6
1200	26.427	577.15	7.715 E-6
1300	28.264	570.62	7.885 E-6
1400	30.181	561.26	8.055 E-6
1500	32.178	549.09	8.255 E-6
1600	34.254	534.09	8.395 E-6
1700	36.410	516.28	8.565 E-6
1800	38.646	495.64	8.735 E-6
1900	40.962	472.18	8.905 E-6
2000	43.358	445.90	9.075 E-6

密度 $\rho = 6500 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

線膨脹率 $\alpha = 5.675 \text{ E-6} + 1.7 \text{ E-9 T (1/°C)}$

熱伝導率 $\kappa = 0.016 \{ 7.71 + 6.1 \text{ E-3 T} + 2.9 \text{ E-6 T}^2 \} \text{ (W/cm}^2\text{°C)}$

比熱 $C_p = 0.067 + 4.42 \text{ E-5 T} - 2.17 \text{ E-8 T}^2 \text{ (kcal/kg °C)}$

表 3.1.4 動特性パラメータ

即発中性子寿命 (ℓ)		2.56 E - 4 sec
遅発中性子割合 (β)	1 群 β_1	3.33 E - 4
	2 群 β_2	9.31 E - 4
	3 群 β_3	7.81 E - 4
	4 群 β_4	1.55 E - 3
	5 群 β_5	6.19 E - 4
	6 群 β_6	1.46 E - 4
	合計 β_{eff}	4.36 E - 3
崩壊定数 (λ)	1 群 λ_1	1.01 E - 3
	2 群 λ_2	3.11 E - 2
	3 群 λ_3	1.27 E - 1
	4 群 λ_4	3.34 E - 1
	5 群 λ_5	1.42
	6 群 λ_6	3.67

表 3.1.5 投入及びスクラム反応度

投入反応度		3.29 E - 4 ($\Delta k / \text{sec}$)
	0.00 sec	0.0
	1.23	0.0
	1.40	-0.095 E - 2
スクラム	1.55	-0.191 E - 2
反応度	1.70	-0.293 E - 2
($\Delta k / k$)	1.83	-0.391 E - 2
	1.96	-0.540 E - 2
	2.13	-0.910 E - 2
	2.31	-1.438 E - 2
	2.66	-1.636 E - 2

投入反応度は引抜速度 6 cm/s とした連続引抜である。

表 3. 1. 6 フィードバック反応度

パラメータ		反応度 ($\Delta k/k$)
ドップラー 反応度	燃料温度	200 0.81 E-2
	(°C)	300 0.59 E-2
		500 0.21 E-2
		620* 0.0
		700 - 0.13 E-2
		1000 - 0.57 E-2
		1200 - 0.83 E-2
		1500 - 1.18 E-2
ボイド 反応度	ボイド率	0* 0.0
	(%)	20 - 0.02 E-2
		40 - 0.013 E-2
		60 0.096 E-2
		80 0.425 E-2
		100 1.244 E-2
冷却材温度 反応度	冷却材温度	20 - 3.912 E-2
	(°C)	50 - 3.534 E-2
		100 - 2.852 E-2
		150 - 2.078 E-2
		200 - 1.276 E-2
		250 - 0.494 E-2
		281.54* 0.0
		287.80 0.098 E-2
		300 0.289 E-2

反応度はパラメータ*印での値を基準としている。

表 3. 1. 7 炉心運転条件

炉心圧力 (kg/cm ²)	67.0
初期炉心出力 (MW)	0.483
	(定格出力の 0.1 %)
冷却材流量 (t/h)	5647.5
冷却材入口温度 (°C)	280.0

これらは 1/4 炉心での値である。

又、定格出力は 1930 MW である。

表 3.1.8 EUREKA-SPACE の拡散計算条件

炉心構成	初装荷初期炉心 (図 3.1.1 参照)
炉心平均燃焼度	0 MWd/t
ボロン濃度	19.5 ppm
初期燃料温度	280 °C
初期ボイド率	0 %
拡散計算実行条件	
指定時刻	4, 8, 11, 14, 15 sec
燃料温度変化幅	30 °C
炉出力変化割合	100.0

表 3.1.9 拡散計算による制御棒反応度価値

挿入割合(%)	Σ_a^T 補正係数 = 1.0		Σ_a^T 補正係数 = 5.0	
	keff	反応度価値(% $\Delta k/k$)	keff	反応度価値(% $\Delta k/k$)
100	1.0231813	—	1.0188893	—
80	1.0234244	0.0232	1.0192218	0.0320
60	1.0241640	0.0938	1.0207568	0.1796
40	1.0250745	0.1805	1.0230118	0.3955
33	—	—	1.0237402	0.4651
20	1.0258456	0.2538	1.0250100	0.5861
0	1.0261764	0.2853	1.0261764	0.6970

先に示した反応度を 14 秒を投入すると、その時の反応度は約 0.46% Δk になる。又、制御棒引抜き速度は 6cm/s であるので 14 秒後には 84 cm 引抜かれた事になる（挿入割合に換算すると 77 %）。これらの条件を踏まえて拡散計算による制御棒反応度を算出した。

その結果を表 3. 1. 9 に示す。表より制御棒の全引抜きによる反応度でもわずか 0.29%であるこのため制御棒による ΔT_a を仮想的に 5 倍して反応度を算出した。その結果を表 3. 1. 9 に示すこれによるとほぼ 33 %挿入で反応度 0.46%が得られる。従って今回の検証計算では ΔT_a を 5 倍にし、更に制御棒位置が 14 秒で 33 %挿入になるよう引抜き速度を調整した（引抜き速度としては 17.7cm/s となる）。

3. 2 検証計算結果の検討

3. 1 に示した検証計算データを基に EUREKA-ATR を用いて検証計算を実施した。この計算を基準ケースとし、結果を検討するためにいくつかの感度解析を行った。これらの計算ケースの一覧を表 3. 2. 1 に示す。

まず基準ケースによる結果を図 3. 2. 1 ～ 10 に示す。これらのうち、図 3. 2. 1 ～ 2 は EUREKA-2 が出力する炉出力、反応度変化及びヒートスラブ # 6 (ch1/uode6) の燃料温度、ボイド率の変化である。又、図 3. 2. 3 ～ 3. 2. 10 は空間分布変化を示したものであり、引抜き制御棒に隣接するノードを含む径方向、軸方向の出力密度、燃料温度及びボイド率をプロットしている。尚、径方向分布図については第 5 平面に着目したものである。基準ケースでは空間分布算出のための拡散計算が初期値計算も含めて 9 回実行されており（初期：1 回／指定時刻：5 回／燃料温度変化：3 回）、それらは図 3. 2. 1 に示してある。又、空間分布のプロットはこれらの中から 8 点を選んだものである。EUREKA-ATR による結果を検討するために EUREKA-2 の結果と比較した。EUREKA-2 モデル計算（1 点近似）には今回は EUREKA-ATR コードを用いた。EUREKA-2 の 1 点近似計算方法としては EUREKA-ATR に与える拡散計算の実行条件を全過渡期間実行しないデータとし、初期値計算で得た分布を一定として使用した。この計算が表 3. 2. 1 に示したケース 2 ～ 3 の一点近似ケース①、②である。①は制御棒引抜き前の空間分布を全過渡期間一定としたもの、②は制御棒引き抜き後（33 %挿入）の空間分布を全過渡期間一定として使い続けたいものである。図 3. 2. 11 ～ 14 に結果を示す。これらの結果と図 3. 2. 1 ～ 2 に示した基準ケースの結果とを比較検討する。まず炉出力の変化は三者共ピーク時刻に差異は無く、僅かに炉出力のピーク値が違うだけである。ヒートスラブ # 6 の燃料温度、ボイド率についてはケース 1 及び 3 と 2 の間には若干違いは見られるが、ヒートスラブ # 6 はチャンネル 1 に含まれており、このチャンネルは図 3. 1. 1 で分かるとおり炉心の中で 2.5 %の体積を占めているにすぎず、全体に与える影響は少ないと考えられる。一方、これら 3 ケースはスクラム信号は炉出力が定格の 15 %になった時発生し、それから 1.23 秒の時間遅れでスクラムがかかるデータが設定されている。このような条件を考えると、これらのケースの炉出力のピー

クは全てスクラムで抑えられていると言える。言換えるところの検証計算データで指定した炉心構成、引抜き制御棒位置等では空間分布の影響は殆ど無く、炉出力の変化はスクラムが支配的であると思われる。

次にフィードバック反応度に対する感度解析を実施した。表 3.2.1 に示すようにケース 4 としてドップラー反応度を基準ケースの 1.2 倍に、ケース 5 としてボイド反応度を基準ケースの 1.2 に設定した計算を行った。結果を図 3.2.15 ～ 18 に示す。これらの結果と基準ケースとを比べると炉出力ピーク時刻、ピーク値とも殆ど差異は無いと言える。これは各フィードバック反応度には増加した分だけ変化はあるが、先に述べたように炉心の全反応度はスクラム反応度が支配的であり、ドップラーやボイド反応度を僅かに変えても炉心の過渡状態に影響を与えるものではない事を示している。

尚、本節では基準ケースについてのみ空間分布プロット図を示したが、ケース 4、5 については、付録に示す。

表 3.2.1 検証計算ケースの一覧

ケース #	ケース ID	内 容
1	基準ケース	3.1 節に記したデータを使用
2	一点近似ケース①	制御棒引抜き前の空間分布を全過渡期間一定として使用
3	一点近似ケース②	制御棒引抜き後（33%挿入）の空間分布を全過渡期間一定として使用
4	ドップラ増加ケース	ドップラー反応度フィードバックを基準ケースの 1.2 倍に設定
5	ボイド増加ケース	ボイド反応度フィードバックを基準ケースの 1.2 倍に設定

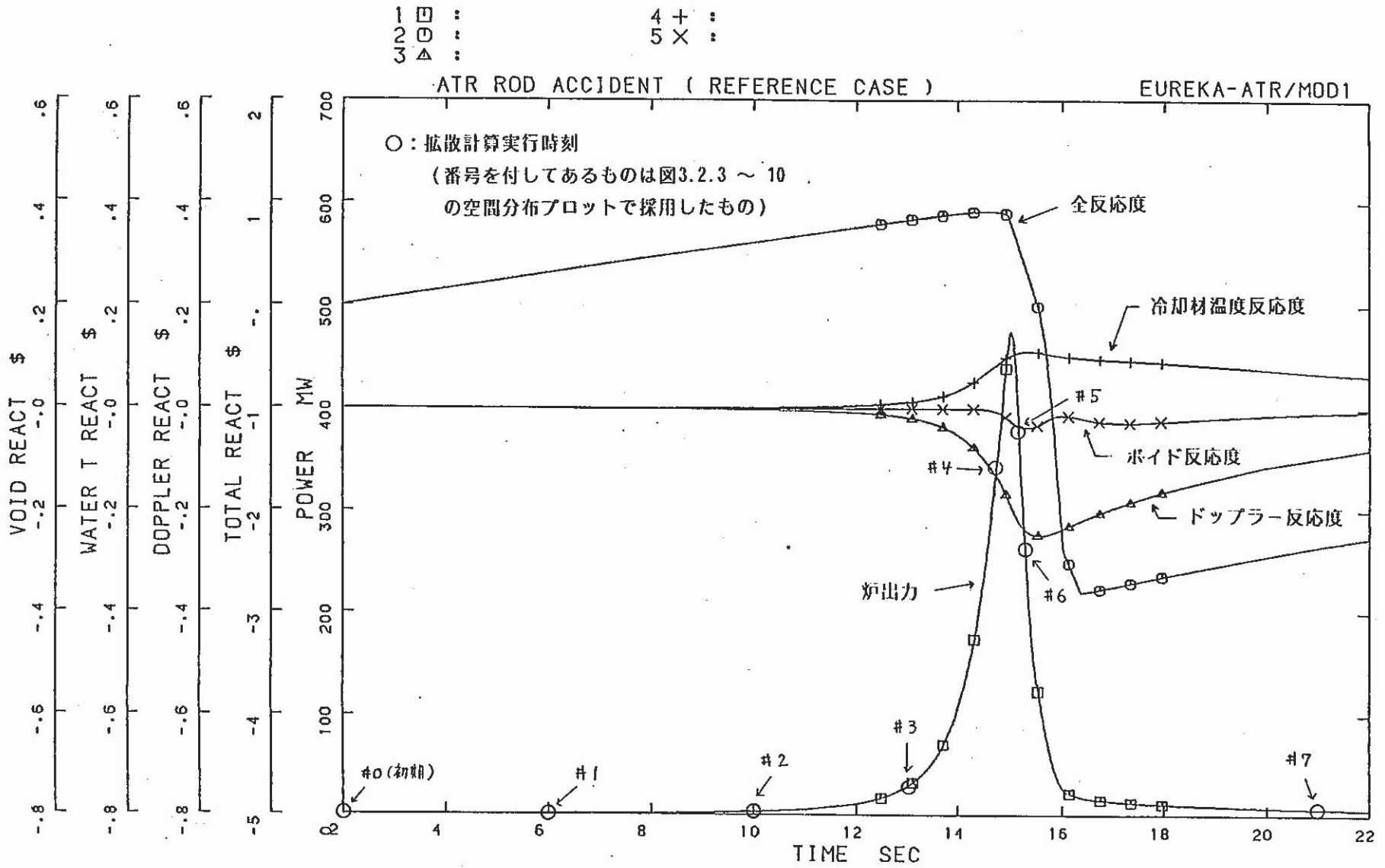


図3.2.1 ケース1：基準ケースにおける炉出力，反応度

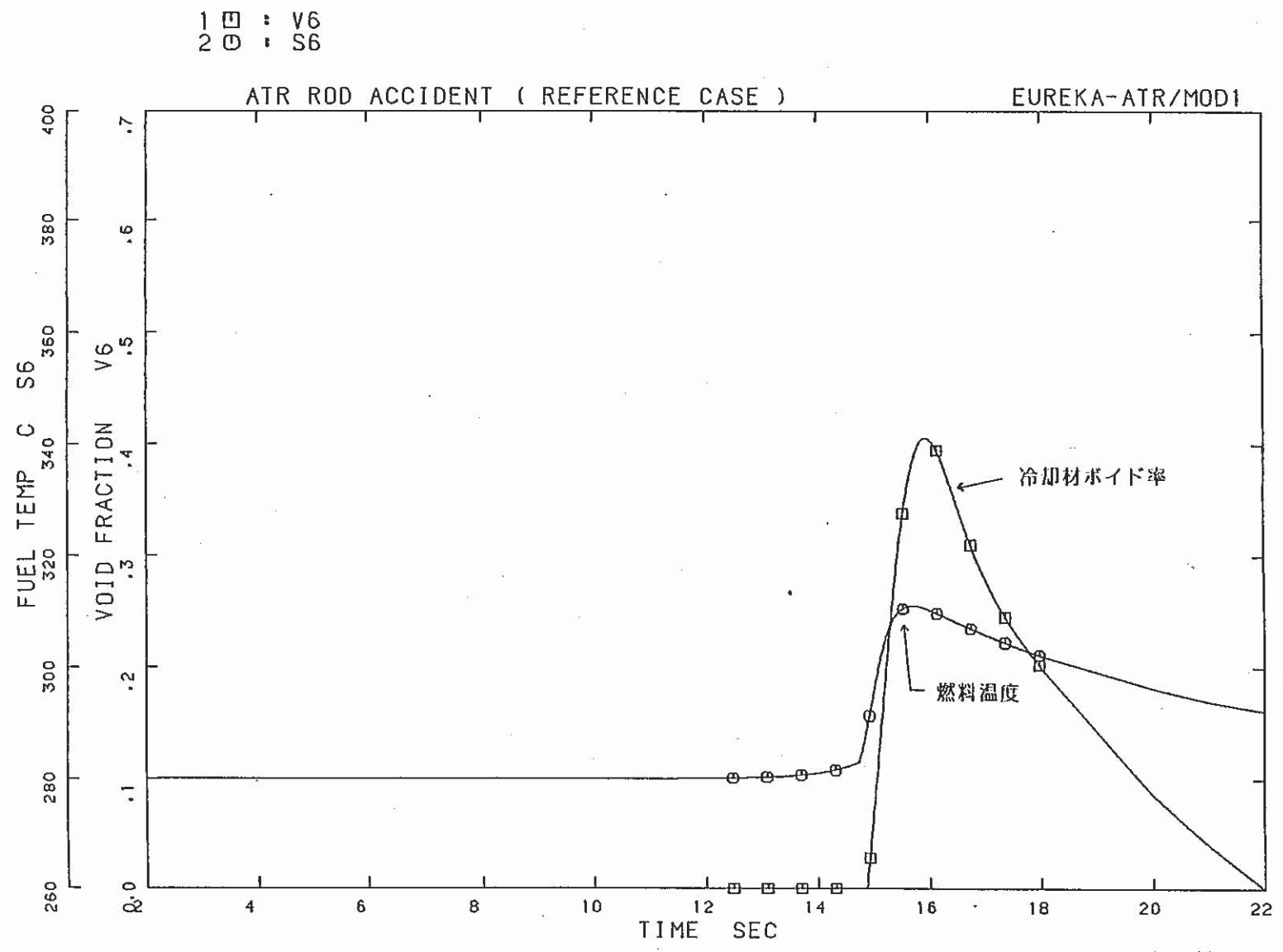


図 3.2.2 ケース 1 : 基準ケースにおける燃料温度, ボイド率 (ヒートスラブ # 6)

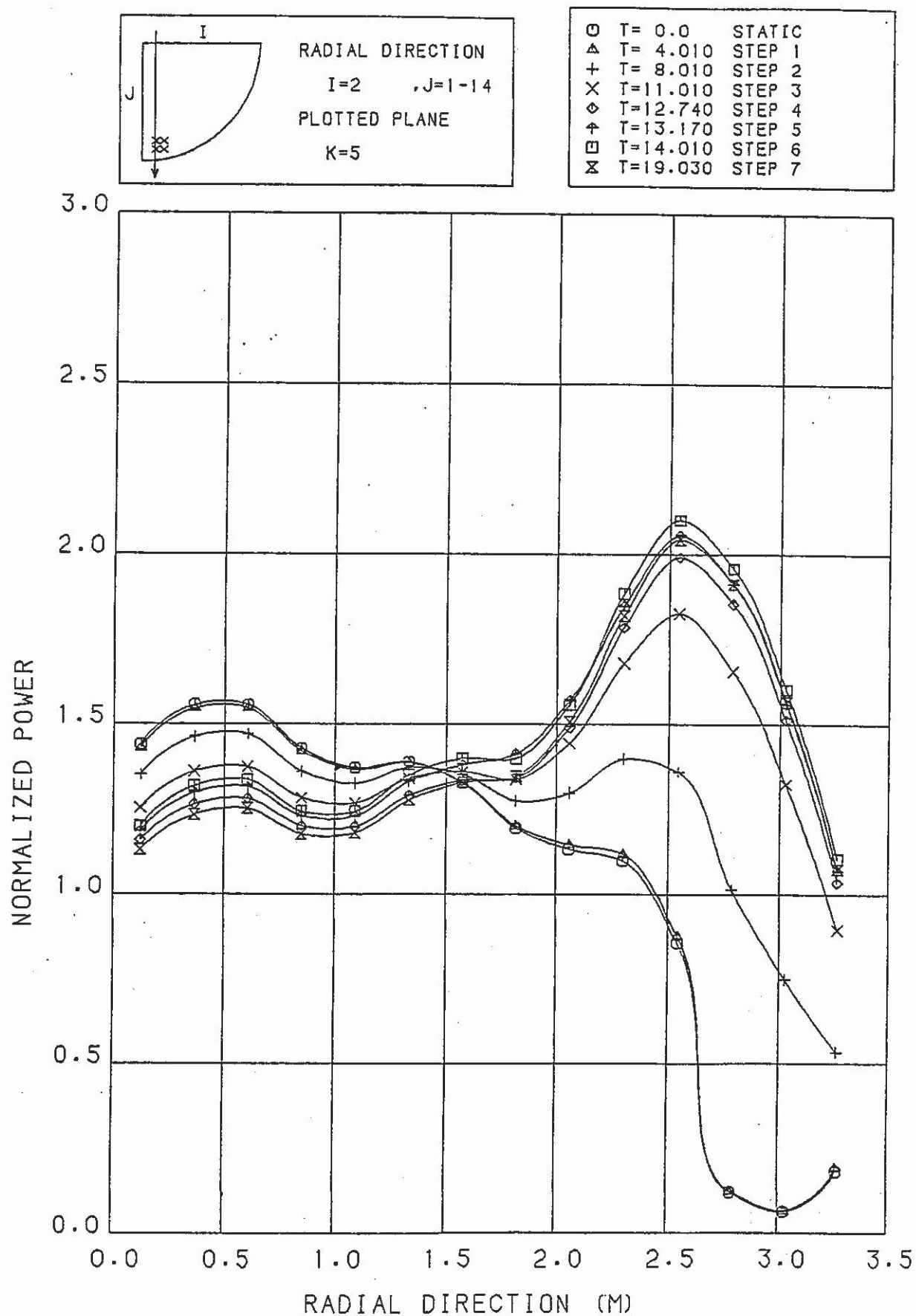


図 3.2.3 ケース 1 : 基準ケースにおける径方向相対出力分布 (第 5 平面)

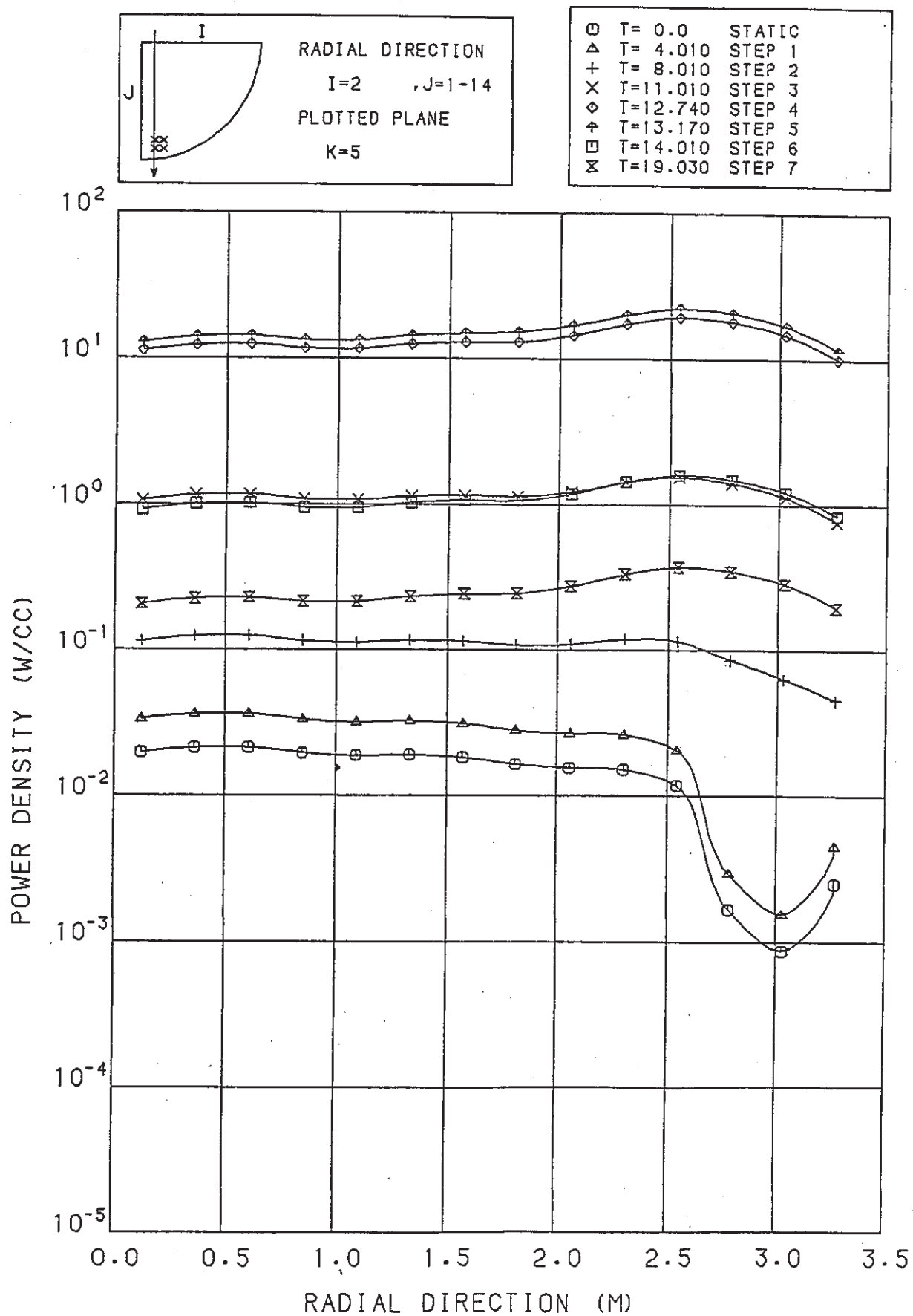


図 3.2.4 ケース 1 : 基準ケースにおける径方向出力密度分布 (第 5 平面)

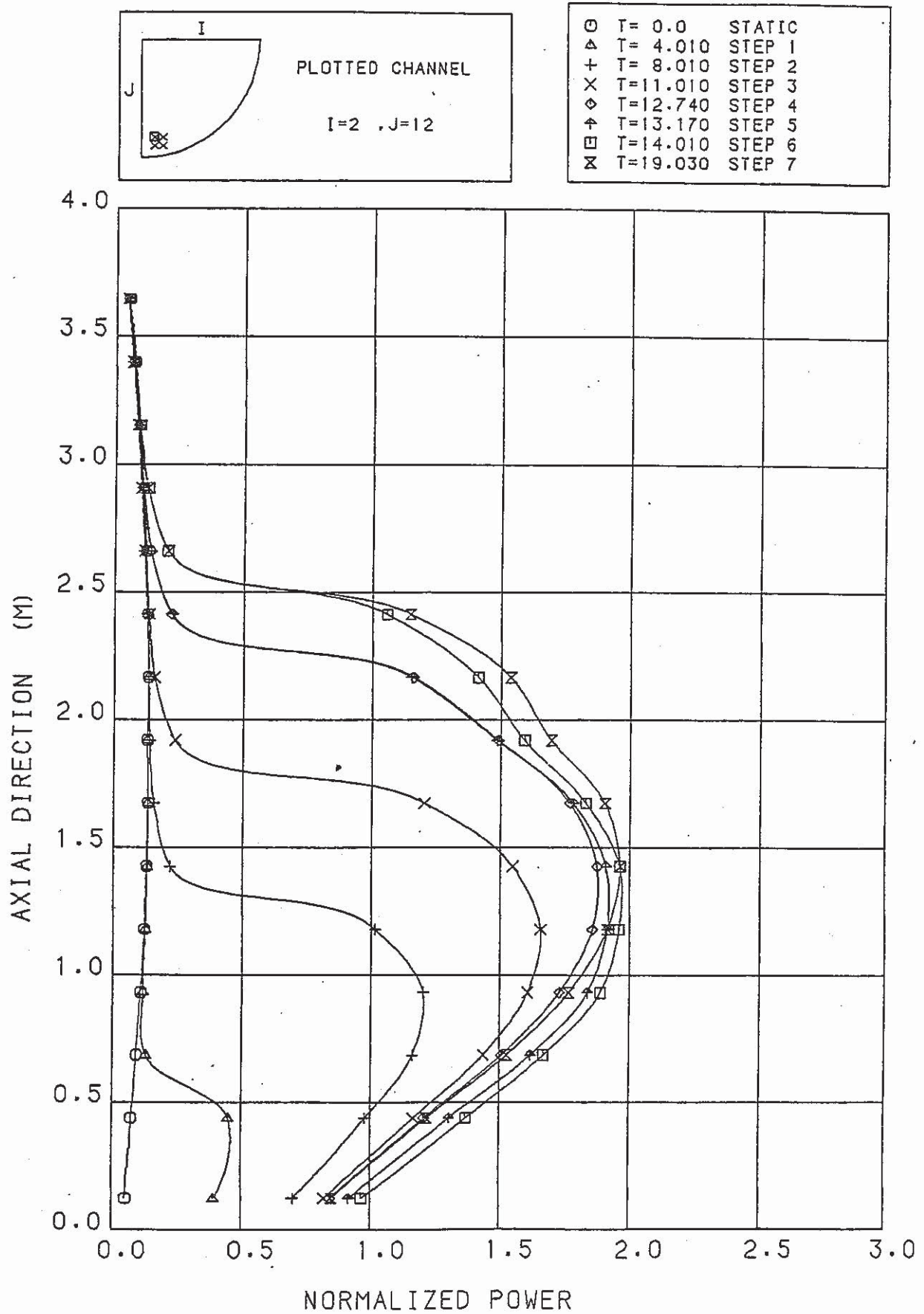


図 3.2.5 ケース 1 : 基準ケースにおける軸方向相対出力分布

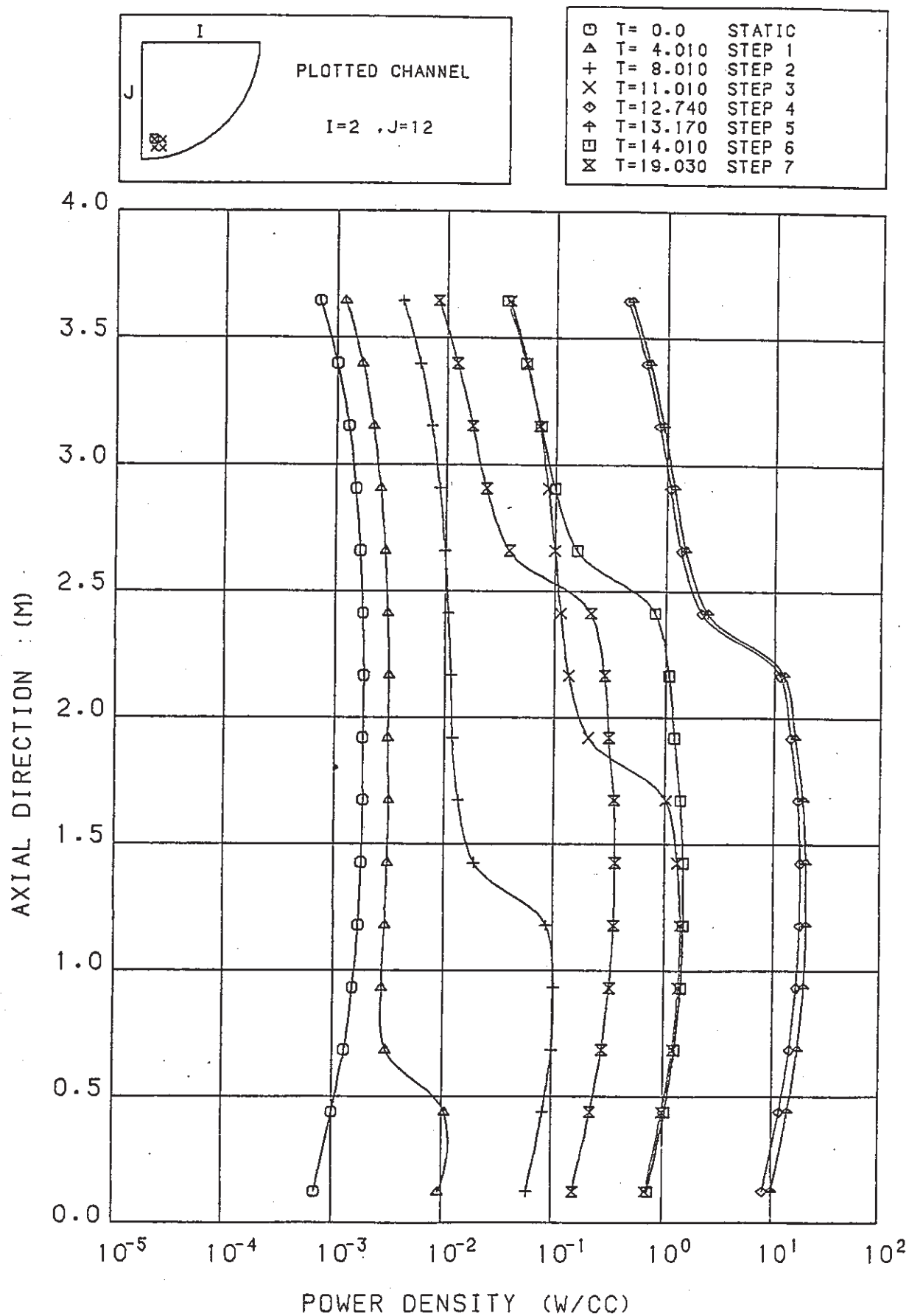


図 3.2.6 ケース 1 : 基準ケースにおける軸方向出力密度分布

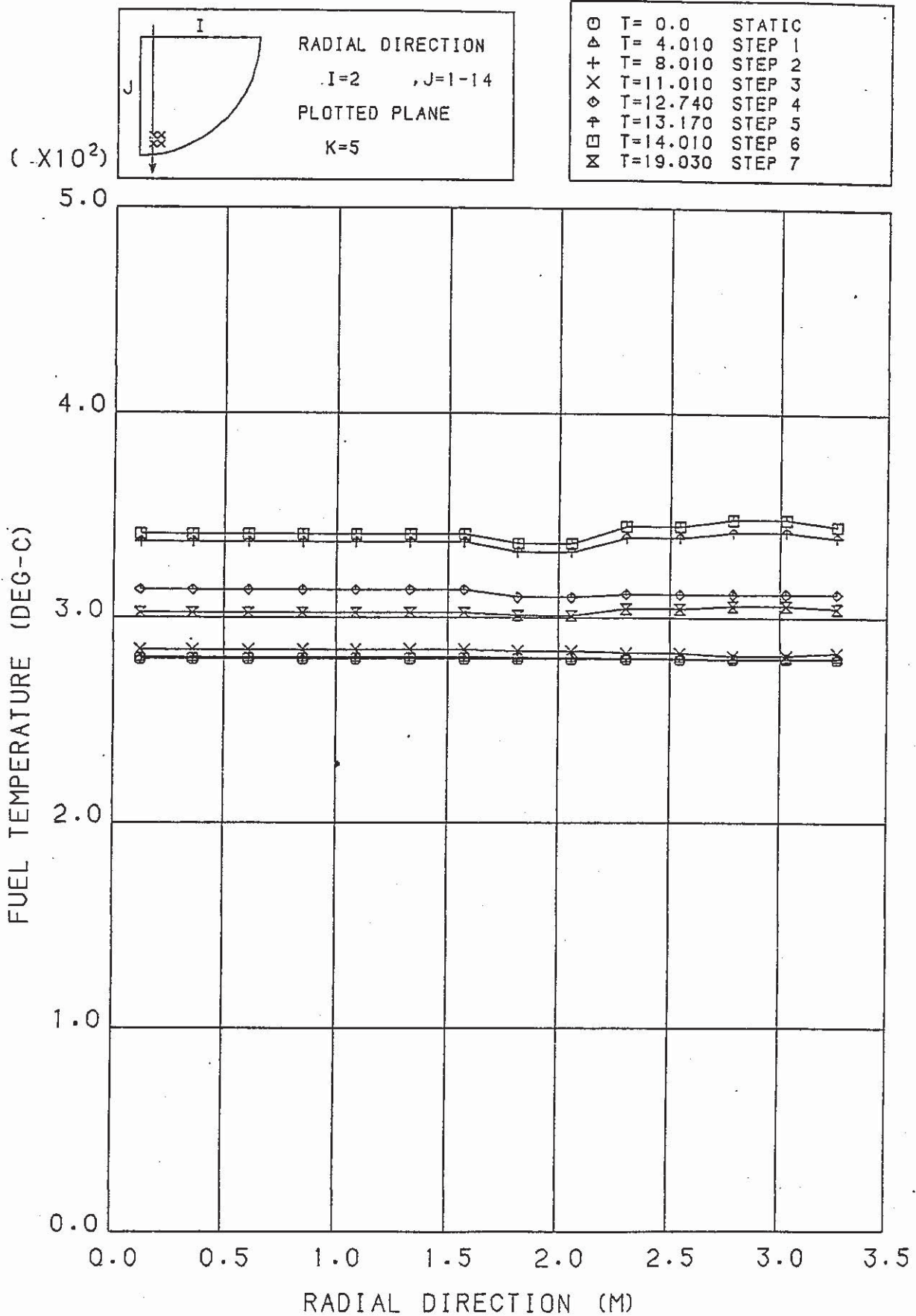


図 3.2.7 ケース 1 : 基準ケースにおける径方向燃料温度分布 (第 5 平面)

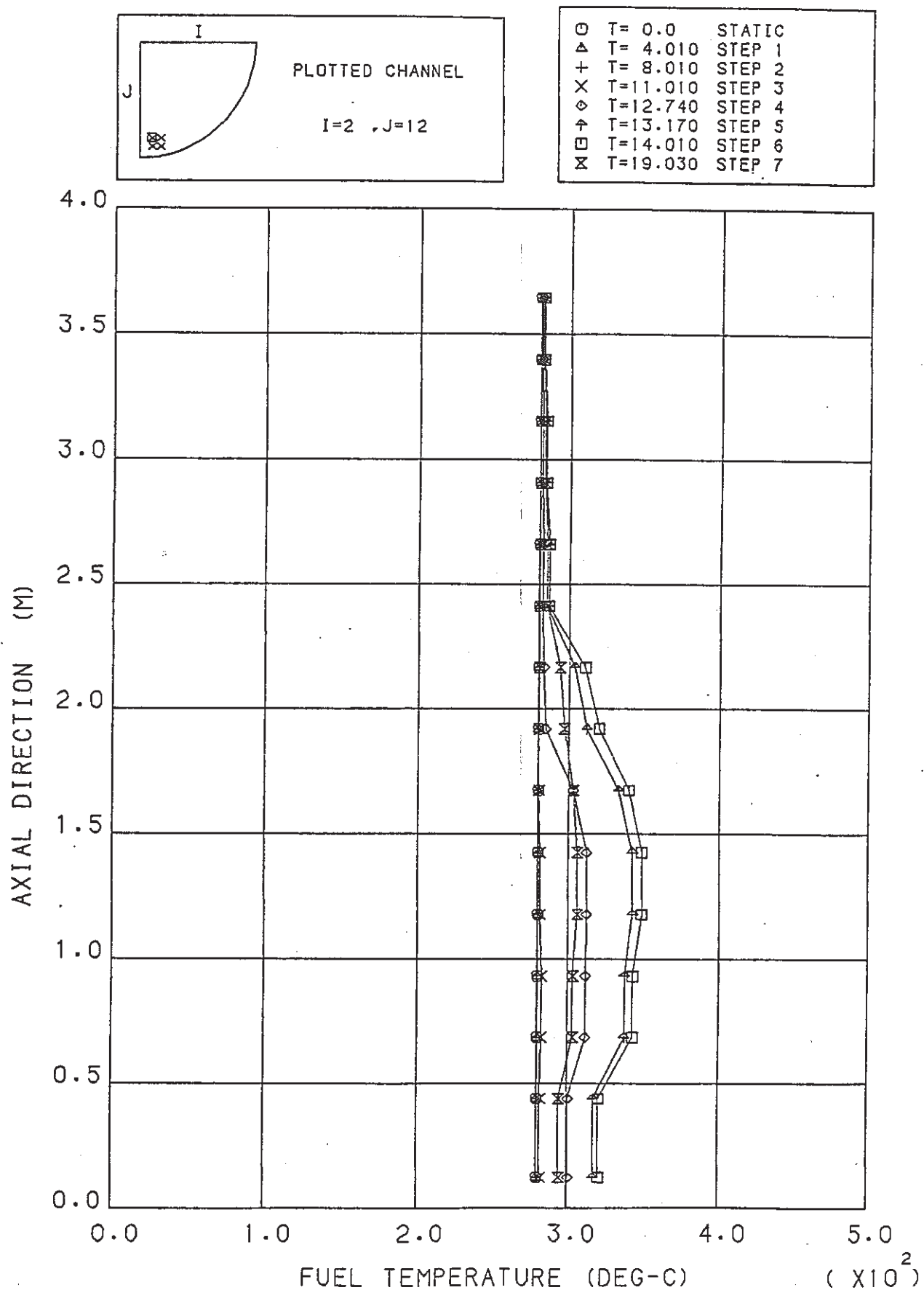


図 3.2.8 ケース 1 : 基準ケースにおける軸方向燃料温度分布

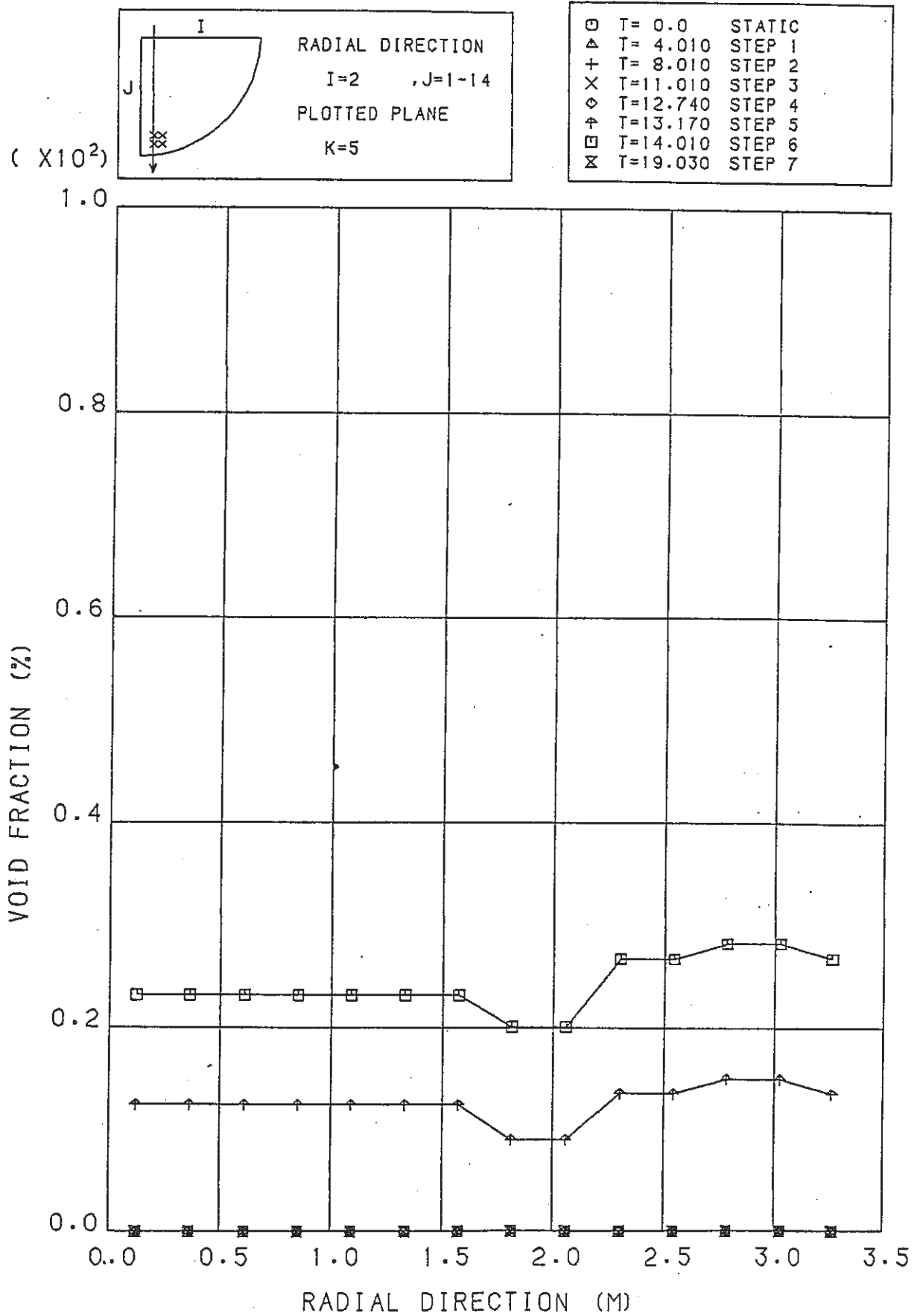


図 3.2.9 ケース 1 : 基準ケースにおける径方向ボイド率分布 (第 5 平面)

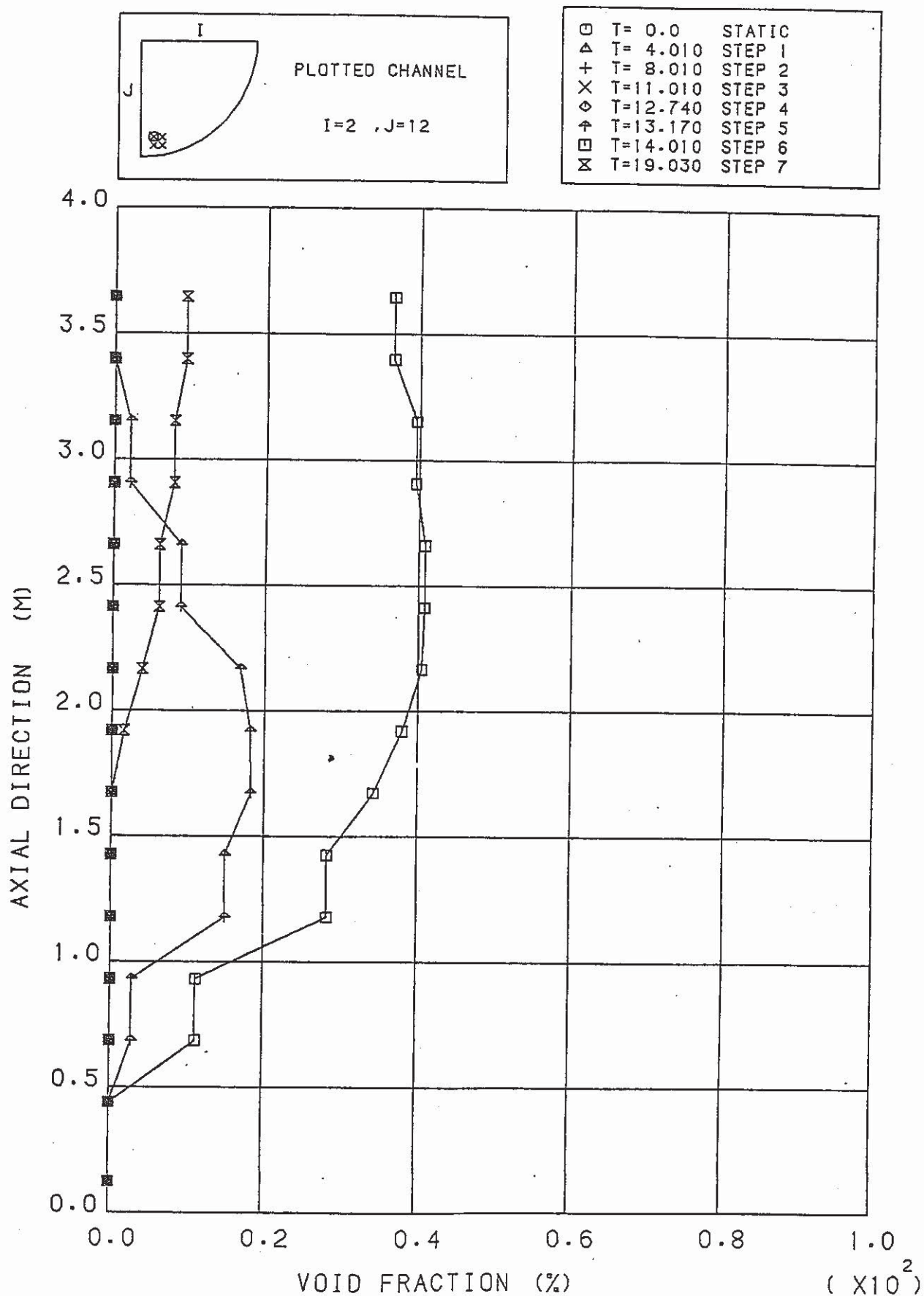


図 3.2.10 ケース 1 : 基準ケースにおける軸方向ボイド率分布

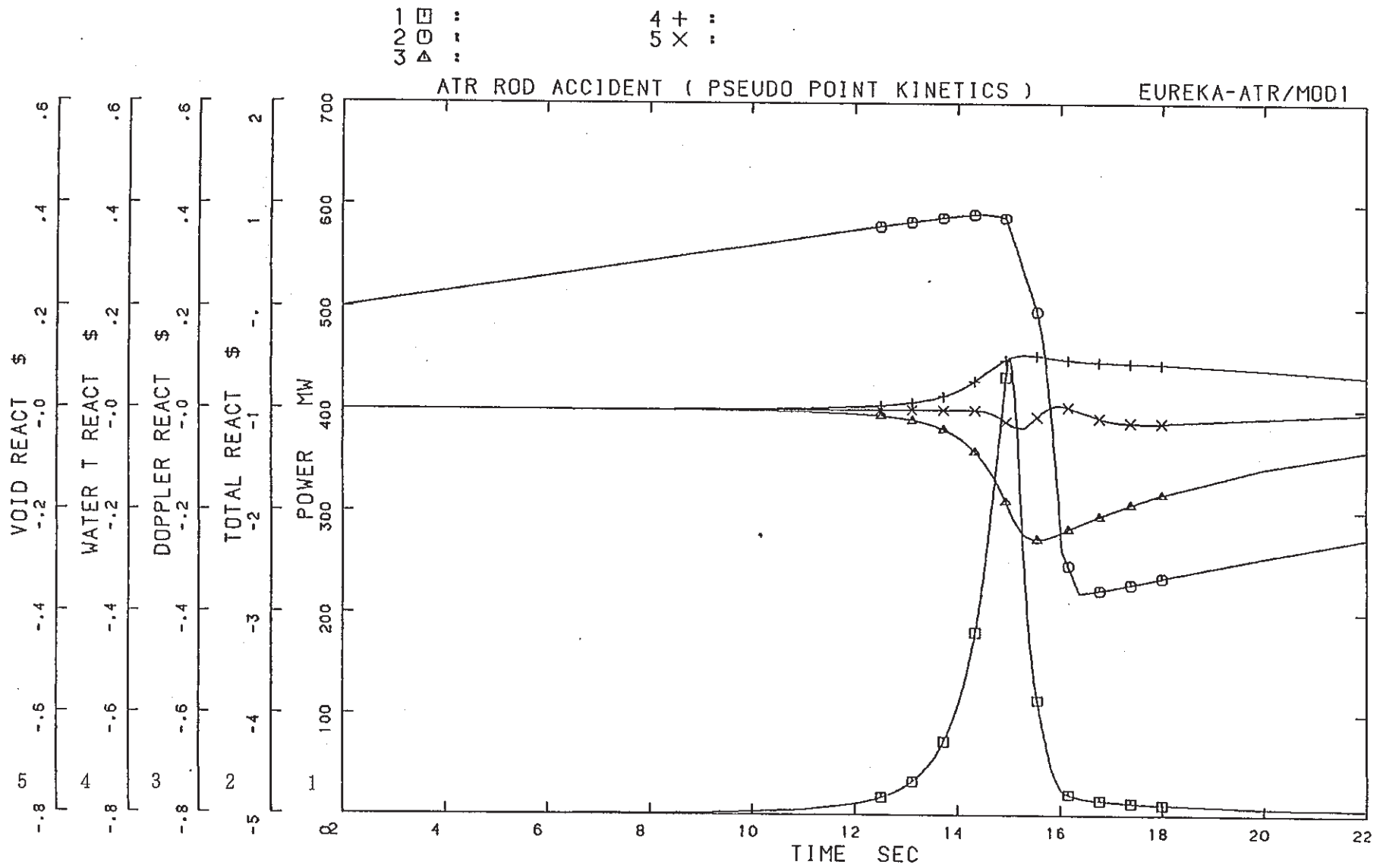


図 3.2.11 ケース 2 : 一点近似ケース①における炉出力, 反応度

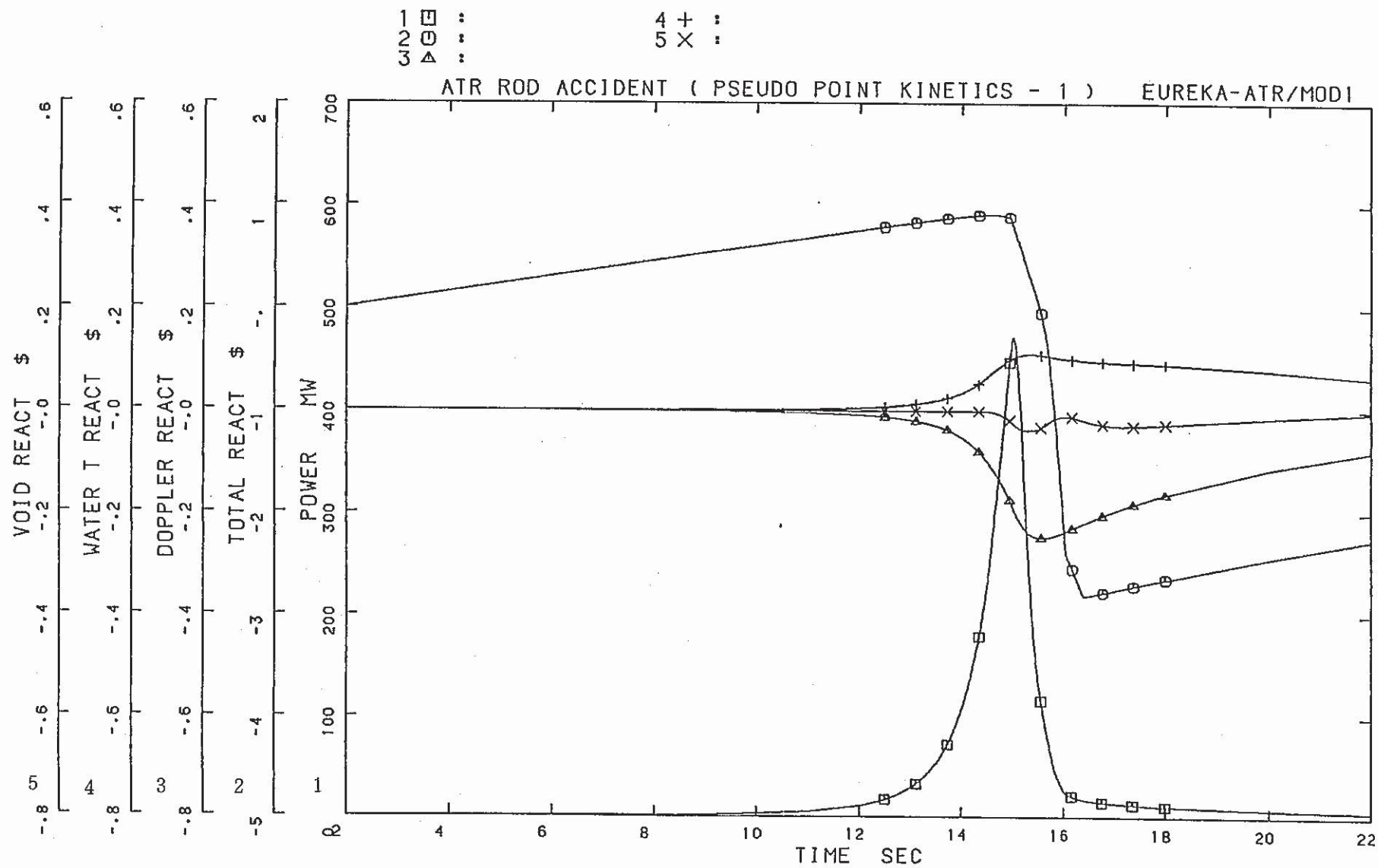


図 3.2.13 ケース 3 : 一点近似ケース②における炉出力, 反応度

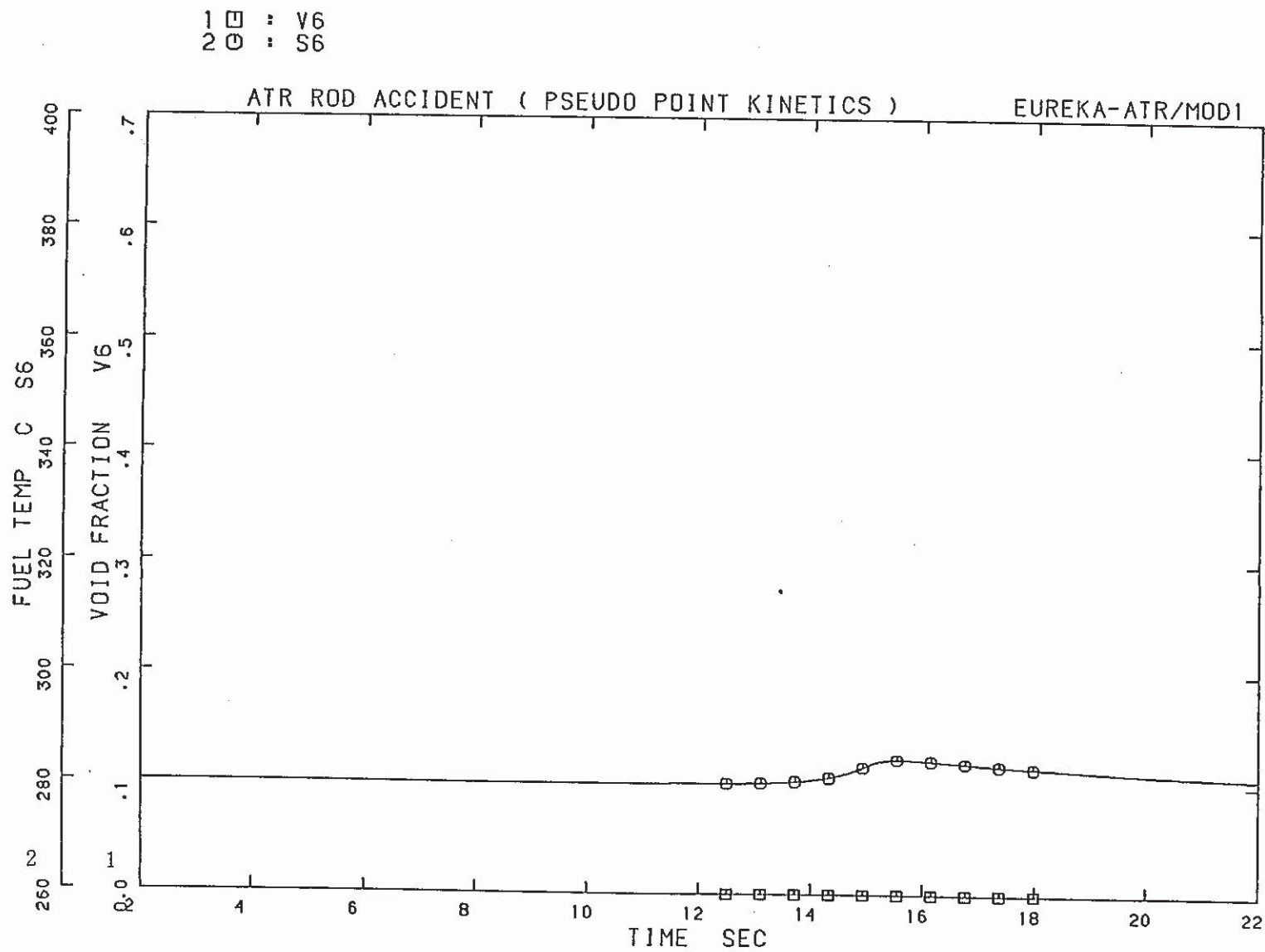


図 3.2.12 ケース 2 : 一点近似ケース①における燃料温度, ボイド率 (ヒートスラブ # 6)

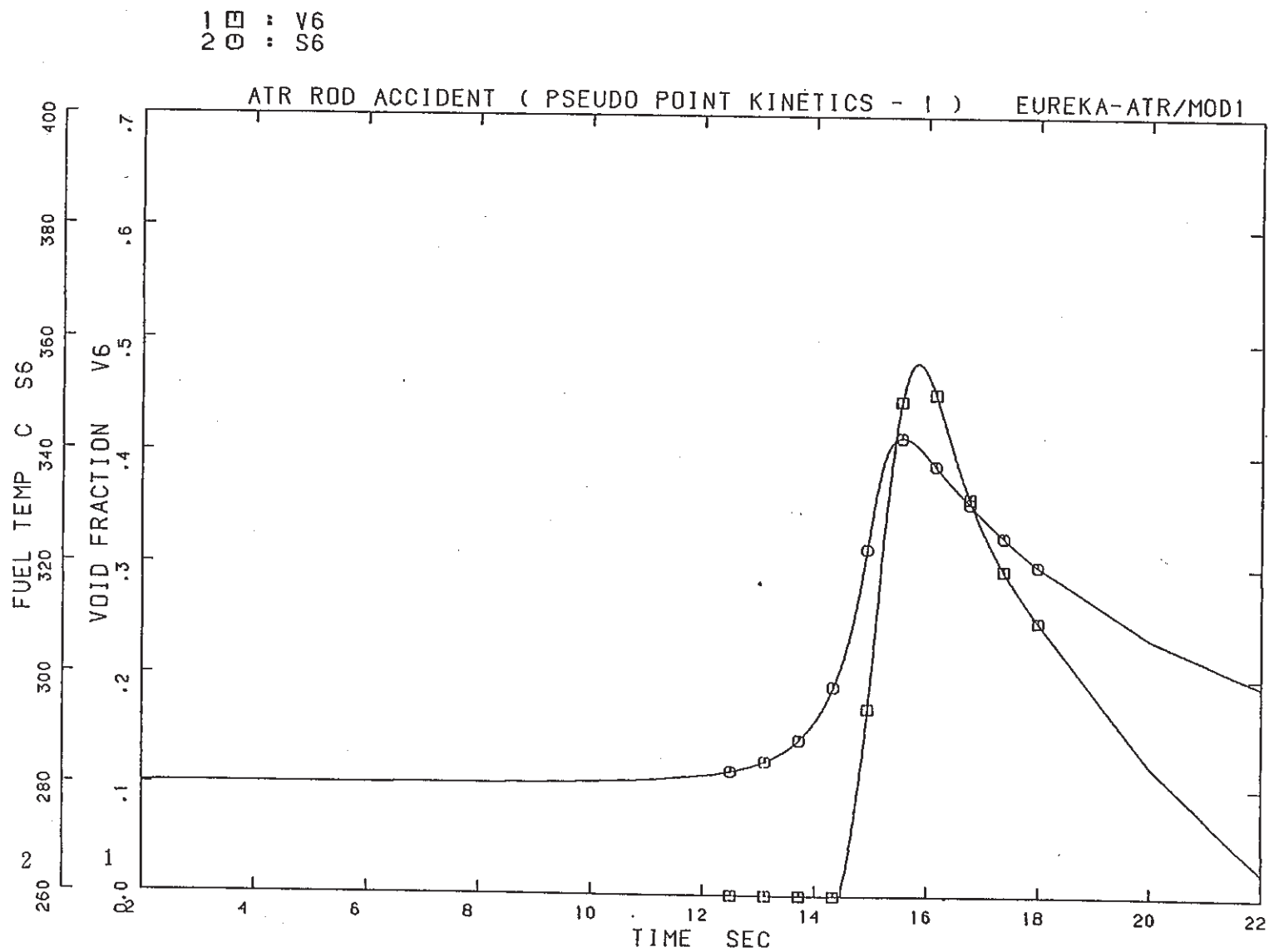


図 3.2.14 ケース 3 : 一点近似ケース②における燃料温度, ボイド率 (ヒートスラブ # 6)

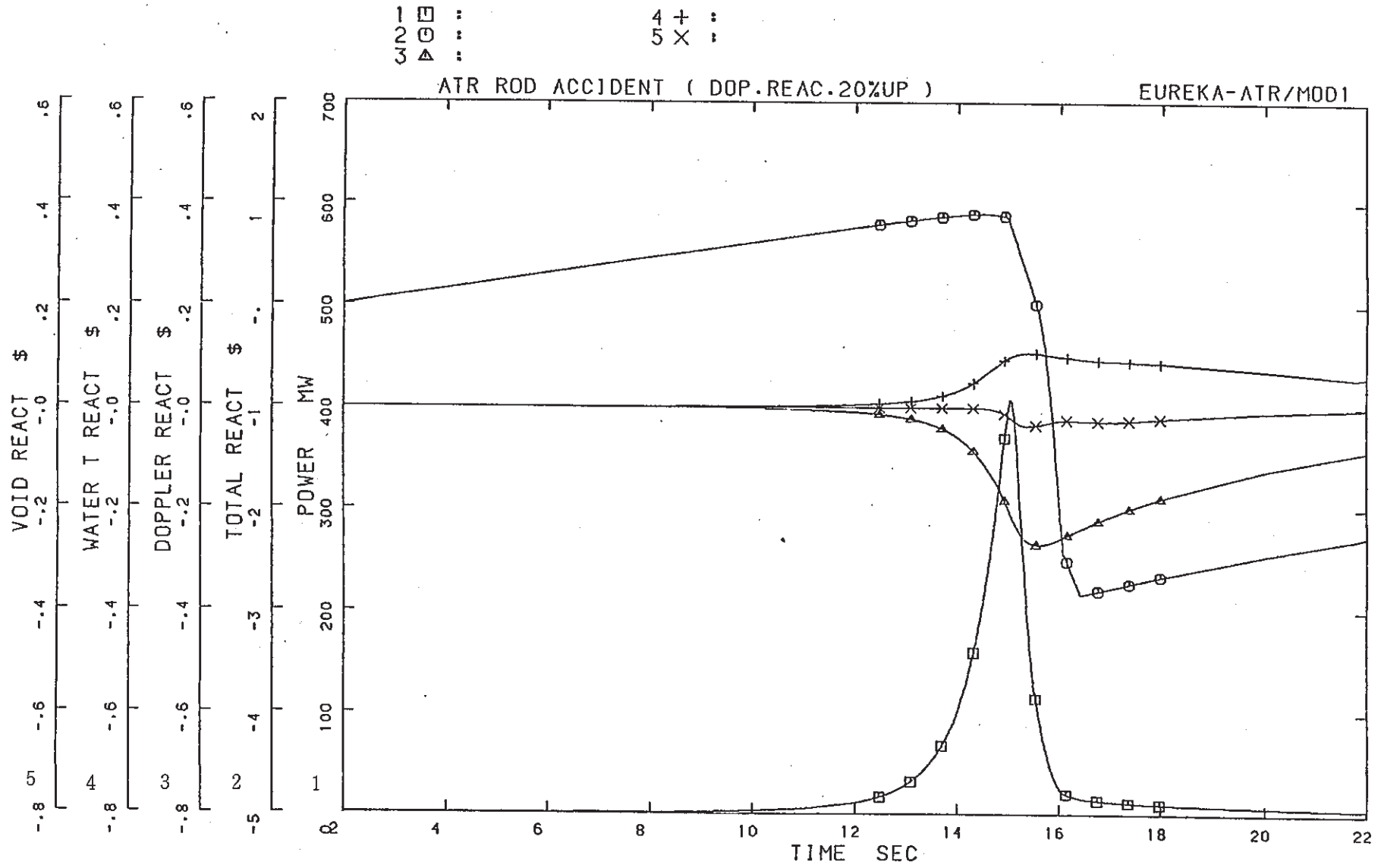


図 3.2.15 ケース 4 : ドップラー増加ケースにおける炉出力, 反応度

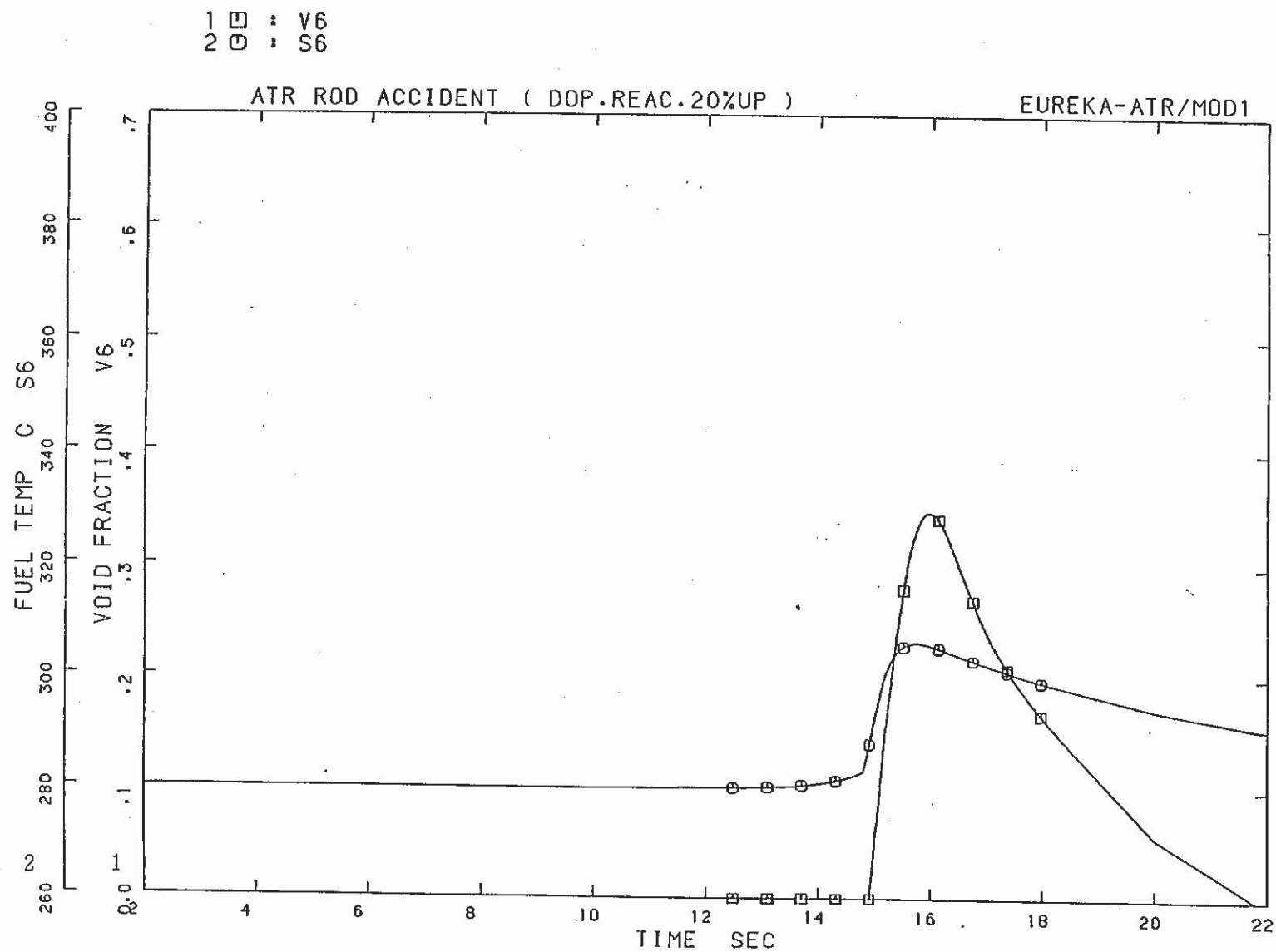


図 3.2.16 ケース 4 : ドップラー増加ケースにおける燃料温度, ボイド率 (ヒートスラブ # 6)

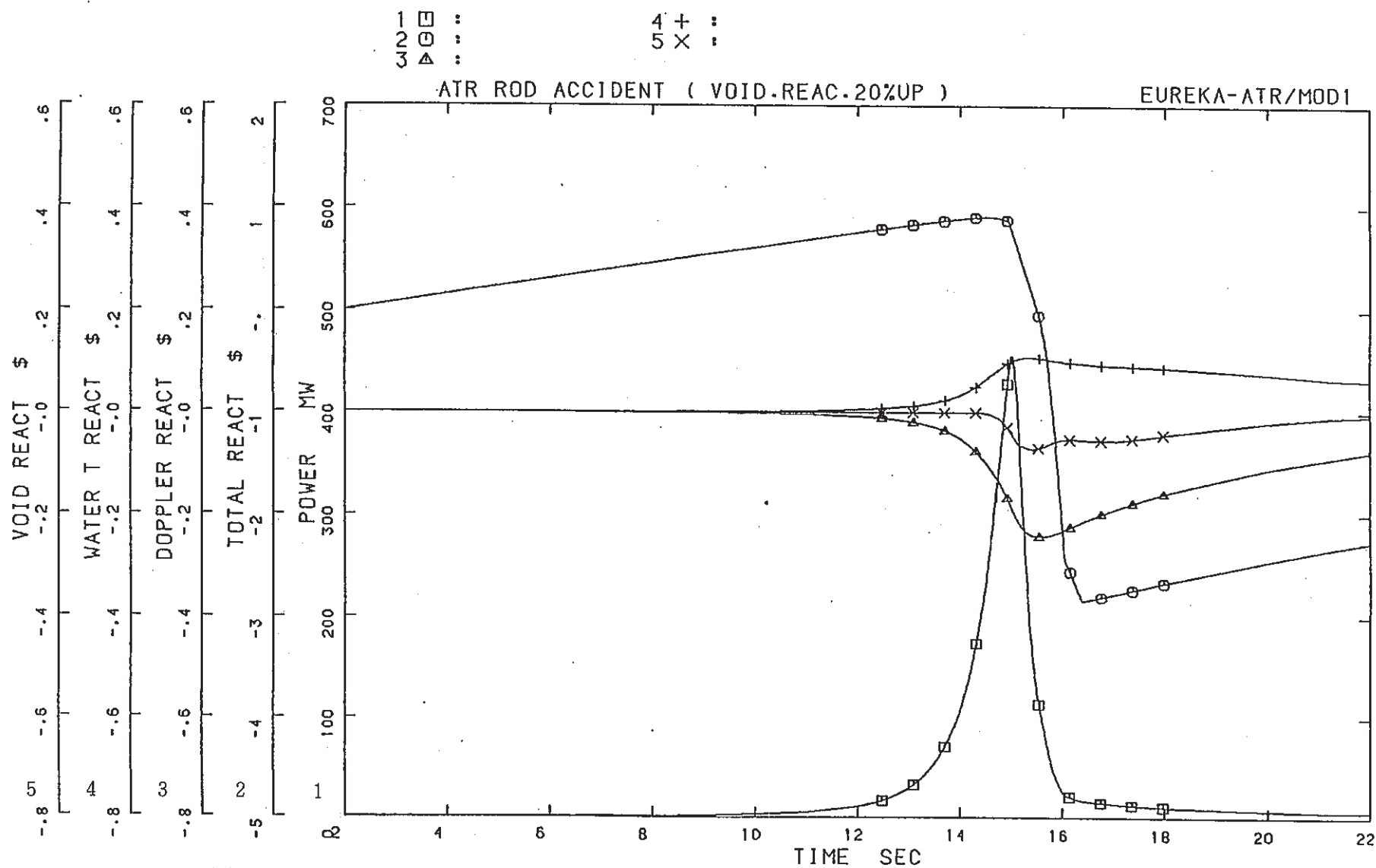


図 3.2.17 ケース 5 : ボイド増加ケースにおける炉出力, 反応度

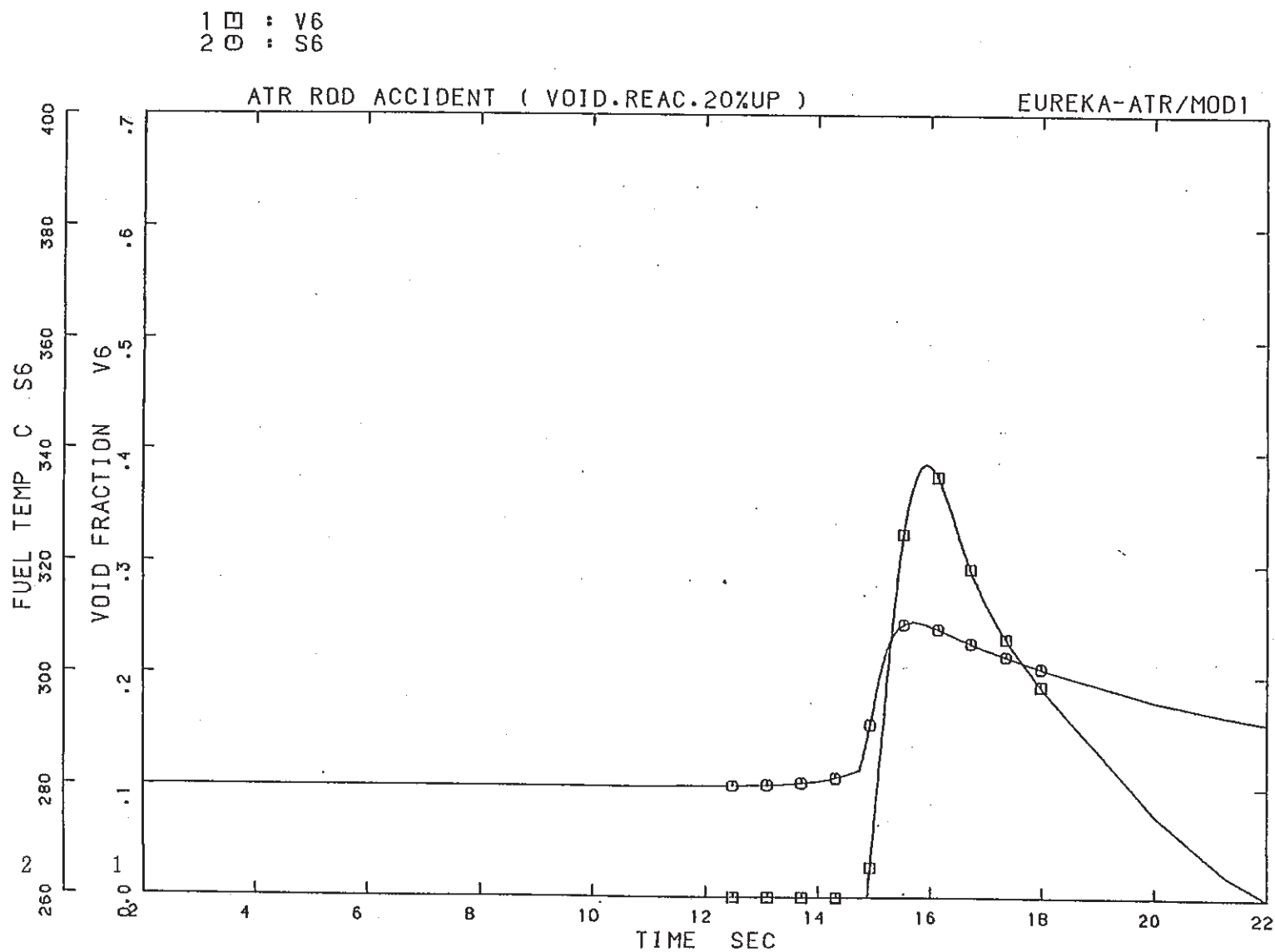


図 3.2.18 ケース 5 ボイド増加ケースにおける燃料温度, ボイド率 (ヒートスラブ # 6)

4. 結 論

EUREKA-ATRコードの開発によって、ATRプラントの空間依存の反応度投入事象の解析が精度良くかつ容易に行えるようになり、「ふげん」及びATR実証炉の安全審査対応に使用していくことができると考えられる。

5. 今後の検討

今回設定した検証計算ケースでは空間分布にはあまり依存せず、又、炉の停止に関してはスクラムによる負の反応度の投入が支配的である事がわかった。これより、今後の検討は、コードの検証計算と機能拡充で実施する。

(1) 検証計算

① 空間分布の依存性の検討

今回の検証計算では空間分布の依存性はあまり見られなかった。従って、拡散計算の実行条件の設定方法やそれらがフィードバック反応度に与える影響を定量的に把握する。

② 炉心構成の検討

制御棒パターン、引抜き制御棒、燃料装荷パターン等炉心構成が変わった場合の過渡特性を検討する。

③ フィードバック反応度の検討

今回の検証計算ではスクラムが支配的であった。そのためスクラム反応度、各フィードバック反応度等を見直す。

④ SPERT実験との比較検討

SPERT-ⅢE実験結果と比較検討を行う。

⑤ その他

(2) 機能拡充

① 2次元モデルの追加

現在のEUREKA-ATRはx-y-zの3次元1/4回転対称炉心のみ解析可能である。 $\frac{1}{2}$ 及び全炉心での解析ができるようにする。

② スクラム機能の追加

EUREKA-ATRにおけるスクラムは、時間依存の反応度テーブルを一点近似動特性モデルに与えるだけであり、スクラムによる空間的な変化は現在取扱えない。従って、スクラム信号

により空間分布もスクラムにより変化させるよう機能を追加する。

③ EUREKA-2 のデータジェネレータの作成

EUREKA-2 部分の入力データはオリジナル EUREKA-2 のままであり、データ作成は複雑である。このため EUREKA-SPACE 部分と同等の入力データジェネレータを EUREKA-ATR のプリプロセッサとして作成する。

④ 核定数の拡充

現在用意されている核定数は燃焼度 0 MWd/t, 初装荷燃料のみである。今後の検証計算のために多くの燃料の核定数を準備する。

謝 辞

EUREKA-ATR 開発に当ってセンチュリーリサーチセンター（株），久保諄洋氏，鎌田稔氏，大倉真也氏，斉藤邦義氏，菊地孝克氏に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

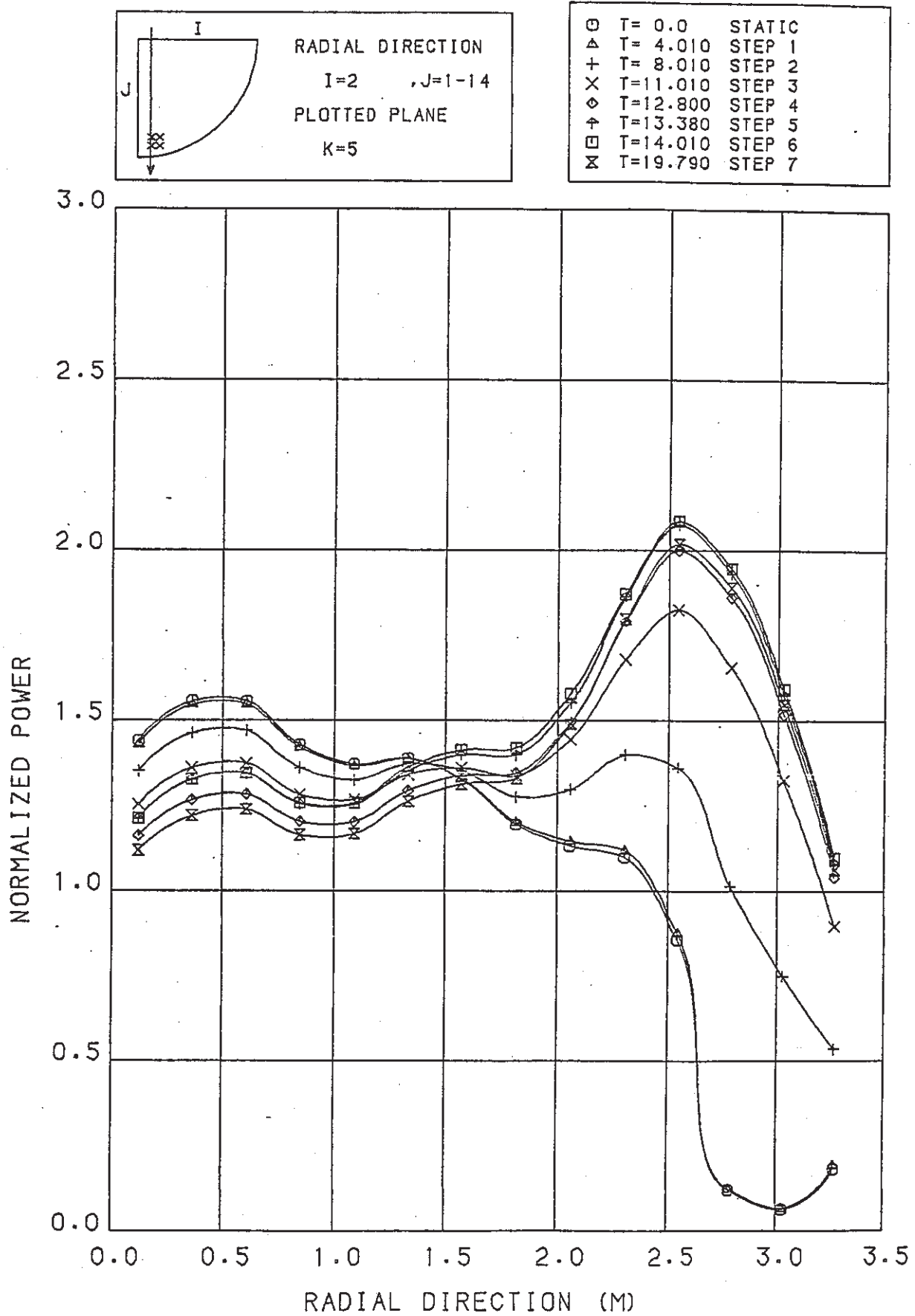
参 考 文 献

- 1) 大西信秋他:「軽水炉の反応度投入事象解析コード, EUREKA-2」, JAERI-M-84-074, 1984年5月.
- 2) T. Harami et al.: "Analysis of the SPERT-III E Core Experiment using the EUREKA-2 Code", JAERI-M-86-136 (1986).
- 3) 稲辺輝雄, 大西信秋:「準静的多次元空間依存炉心動特性解析コード, EUREKA-SPACE」, JAERI-M-7183, 1977年8月.
- 4) M. Ishikawa et al.: "EUREKA-A Computer Code for Uranium-Oxide Fueled, Water Cooled Reactor Kinetic Analysis", JAERI 1235 (Sep. 1974).
- 5) 若林利男, 速水義孝:「空間依存反応度投入事象解析コード (EUREKA-ATR) ユーザーズ・マニュアル」, PNC SN 9520 87-010(1987).
- 6) T. Wakabayashi et al.: "Characteristics of Plutonium Utilization in ATR", NEACRP-A744(1985).
- 7) J. R. Askew et al., J. British. Nucl. Soc. 5 (1966)564.
- 8) 福村信男他:「「ふげん」炉心の燃焼解析コードシステム PHLOX-BURNの開発(1)」, PNC ZN 941 84-95.

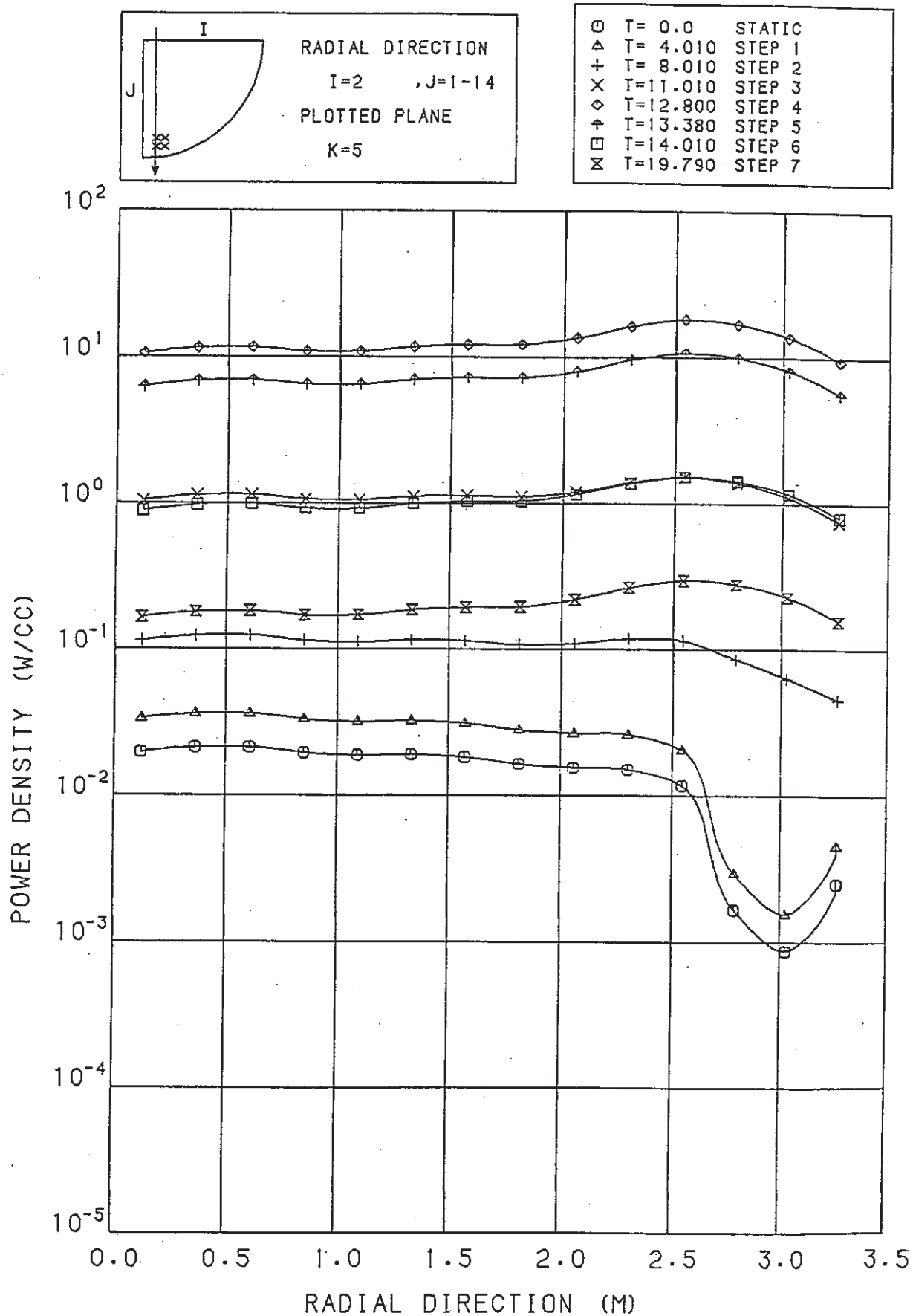
付録 空間分布プロット図

空間分布のプロット図としては第3章に基準ケースについてのみを示した。ここではケース4, 5における以下の空間分布プロット図を示す。

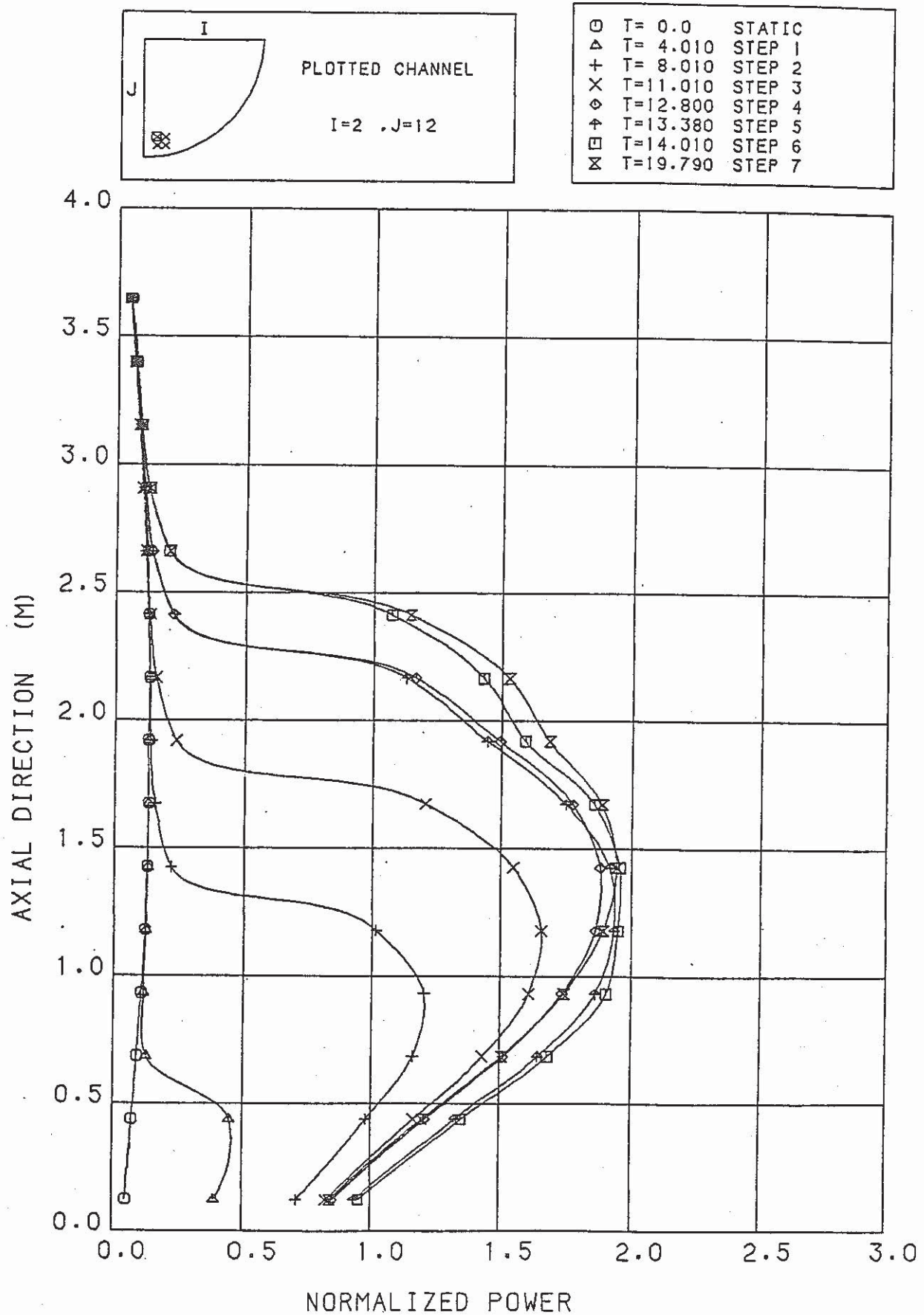
- (1) 第5平面における径方向相対出力分布
- (2) 第5平面における径方向出力密度分布
- (3) 引抜き制御棒に隣接する燃料の軸方向相対出力分布
- (4) 引抜き制御棒に隣接する燃料の軸方向出力密度分布
- (5) 第5平面における径方向燃料温度分布
- (6) 引抜き制御棒に隣接する燃料の軸方向燃料温度分布
- (7) 第5平面における径方向ボイド率分布
- (8) 引抜き制御棒に隣接するチャンネルの軸方向ボイド率分布



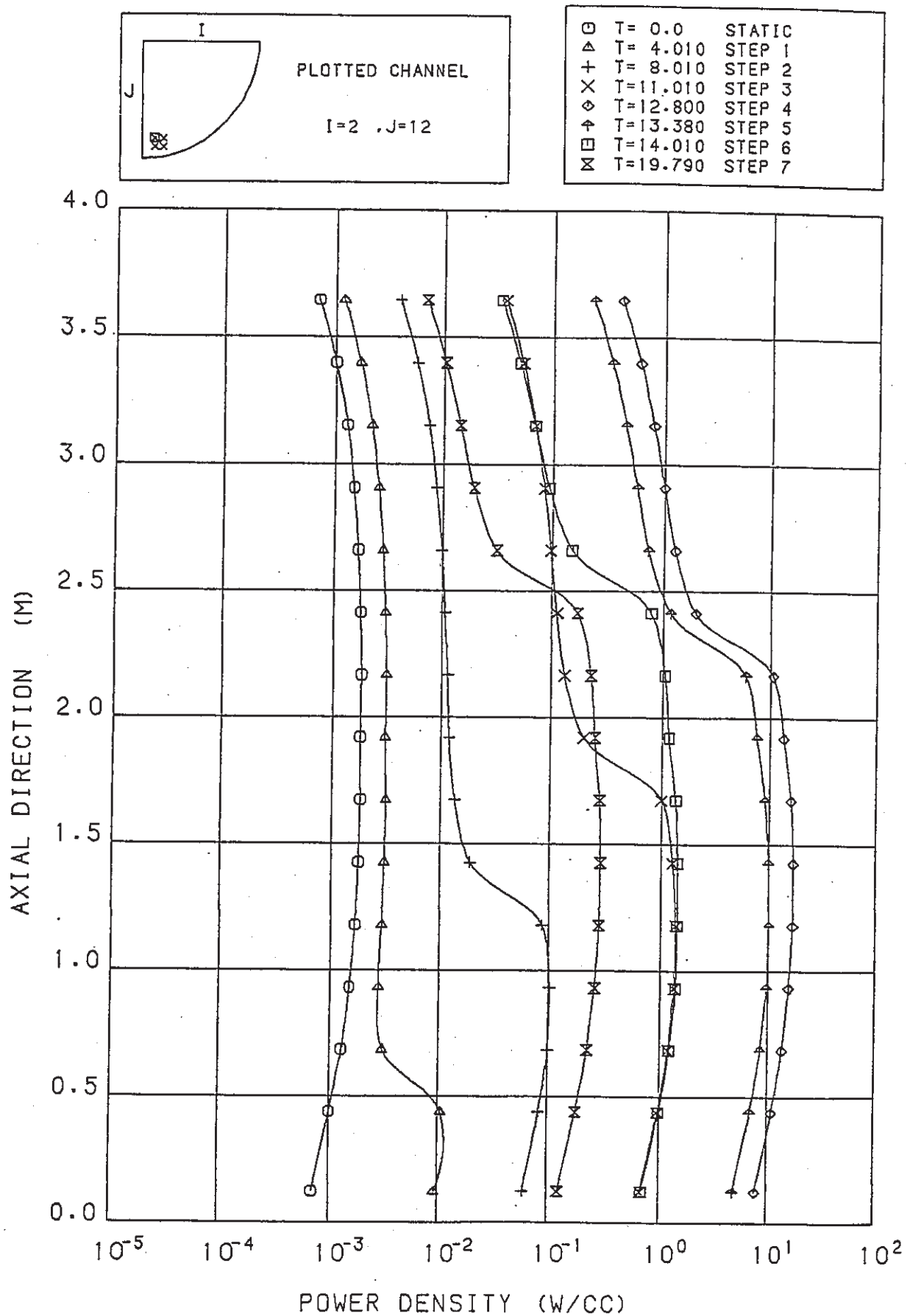
付図1 ケース4: ドップラー増加ケースにおける径方向相対出力分布 (第5平面)



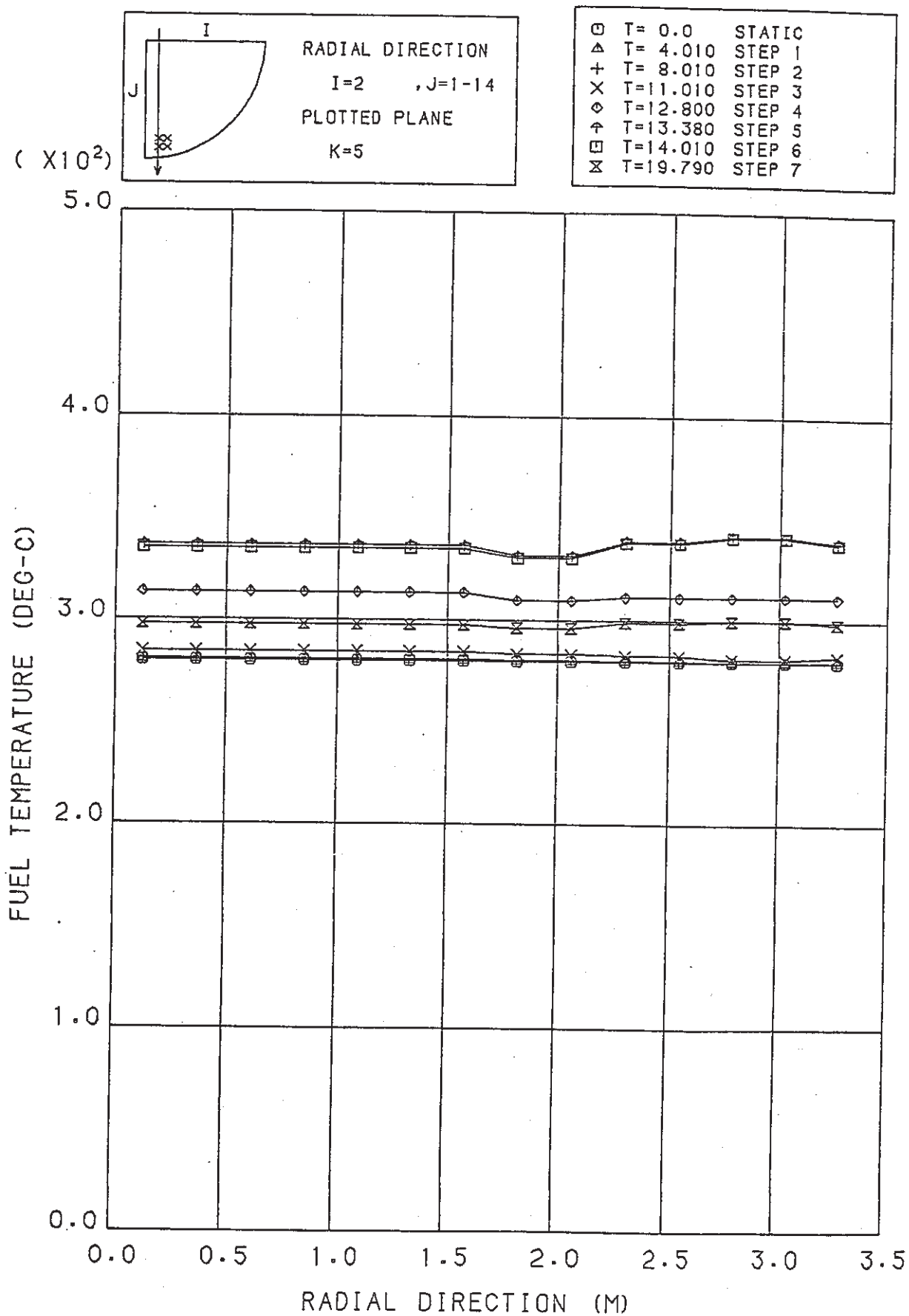
付図2 ケース4：ドップラー増加ケースにおける径方向出力密度分布（第5平面）



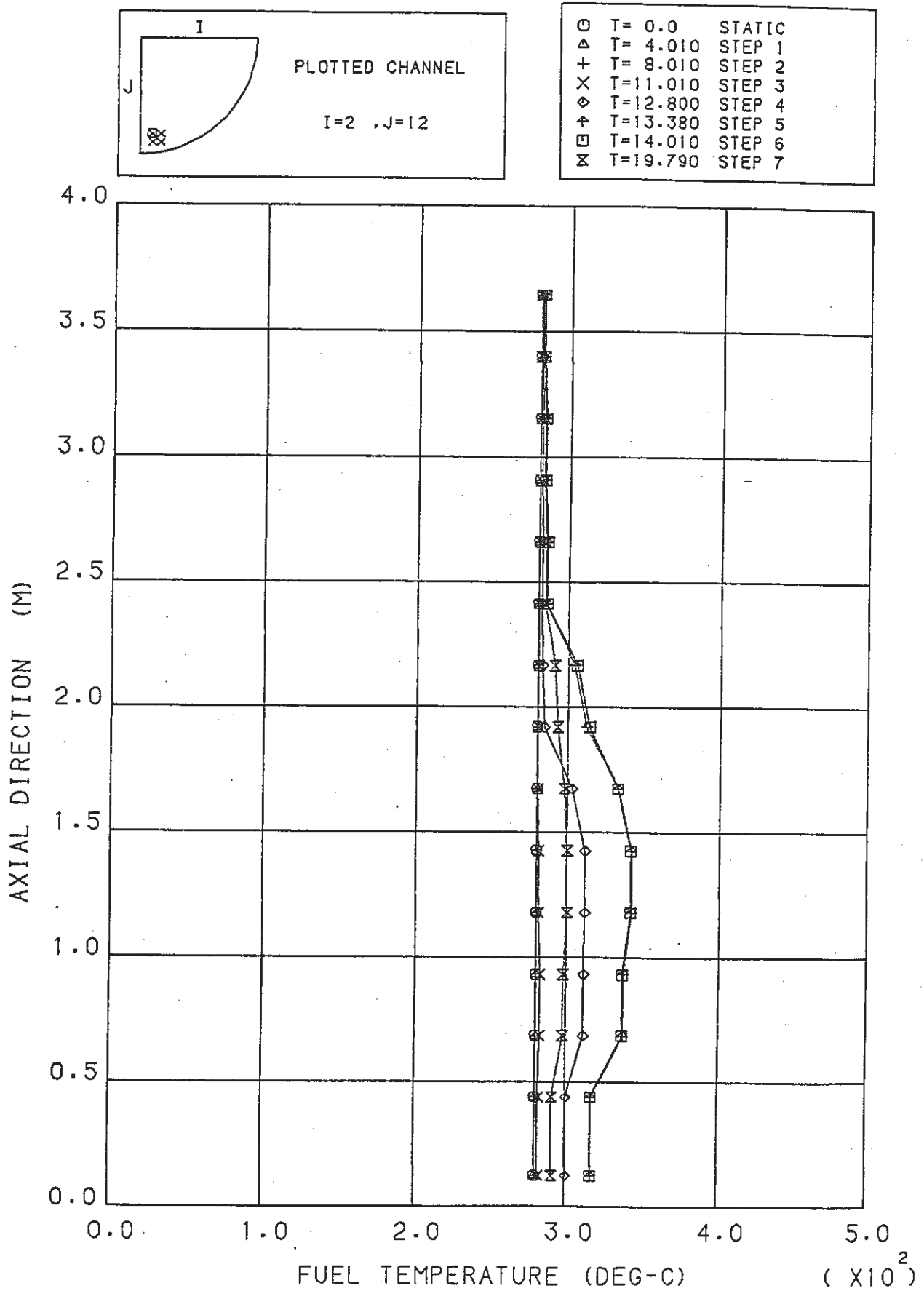
付図3 ケース4: ドップラー増加ケースにおける軸方向相対出力分布



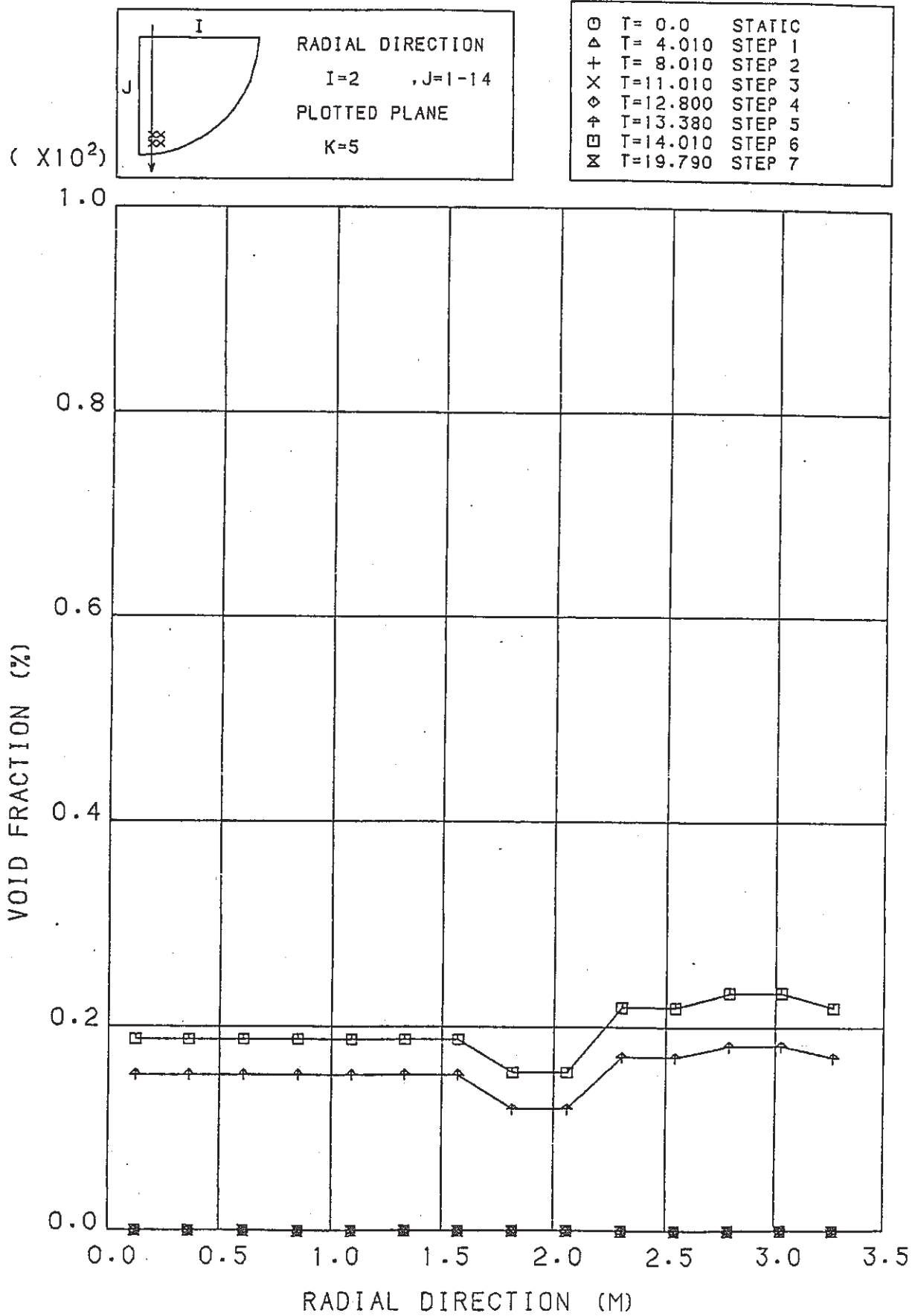
付図4 ケース4: ドップラー増加ケースにおける軸方向出力密度分布



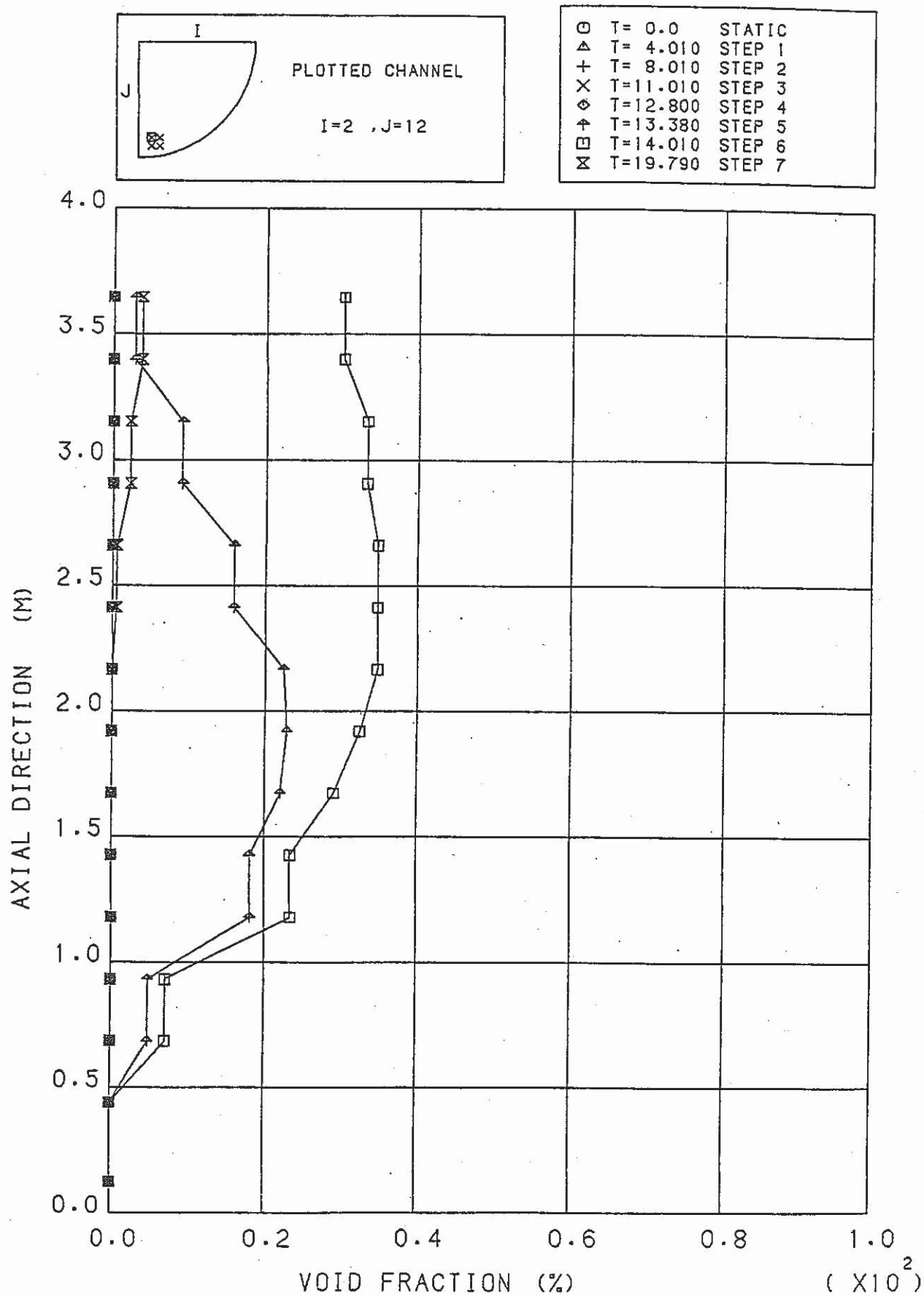
付図5 ケース4：ドップラー増加ケースにおける径方向燃料温度分布（第5平面）



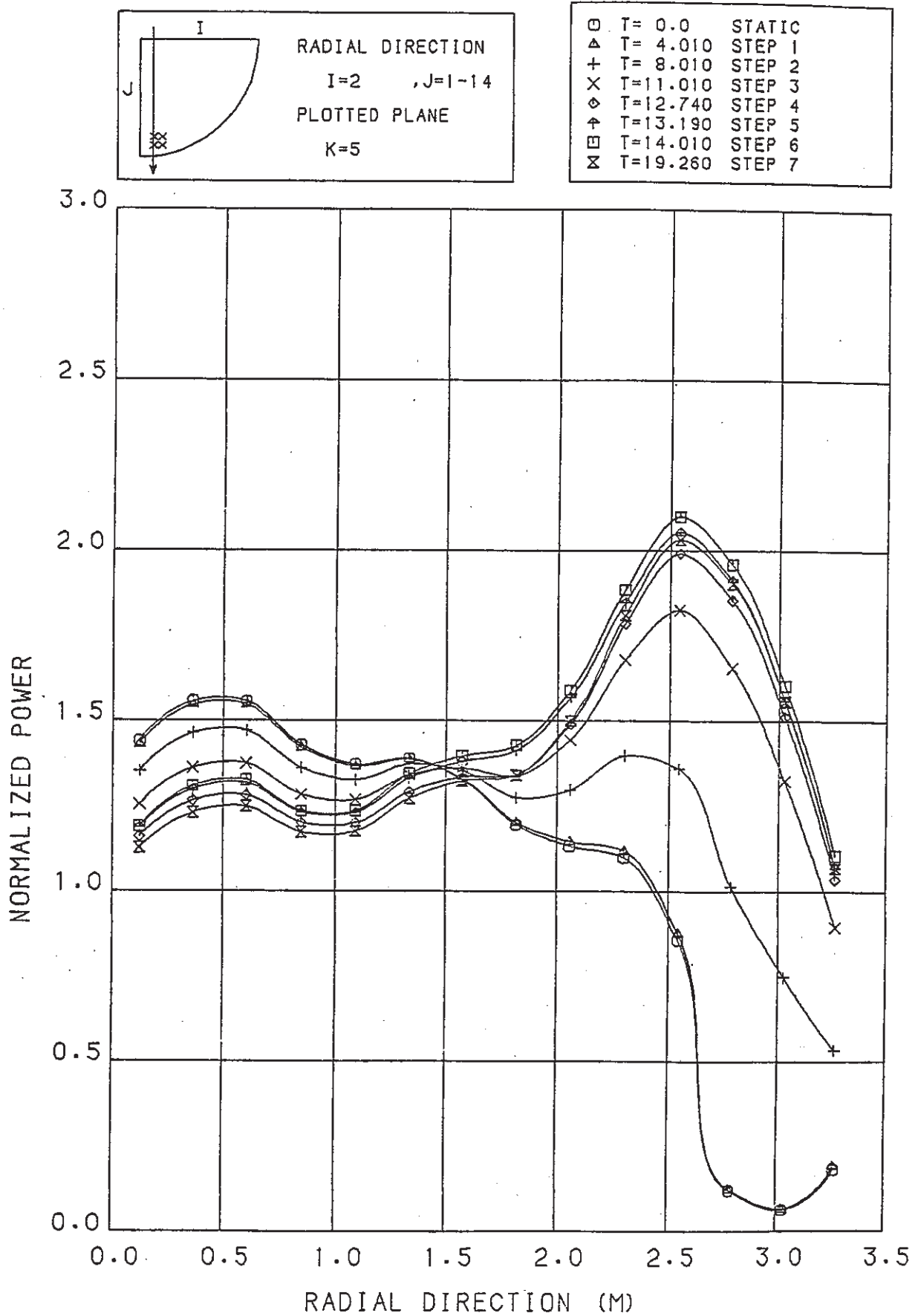
付図6 ケース4：ドップラー増加ケースにおける軸方向燃料温度分布



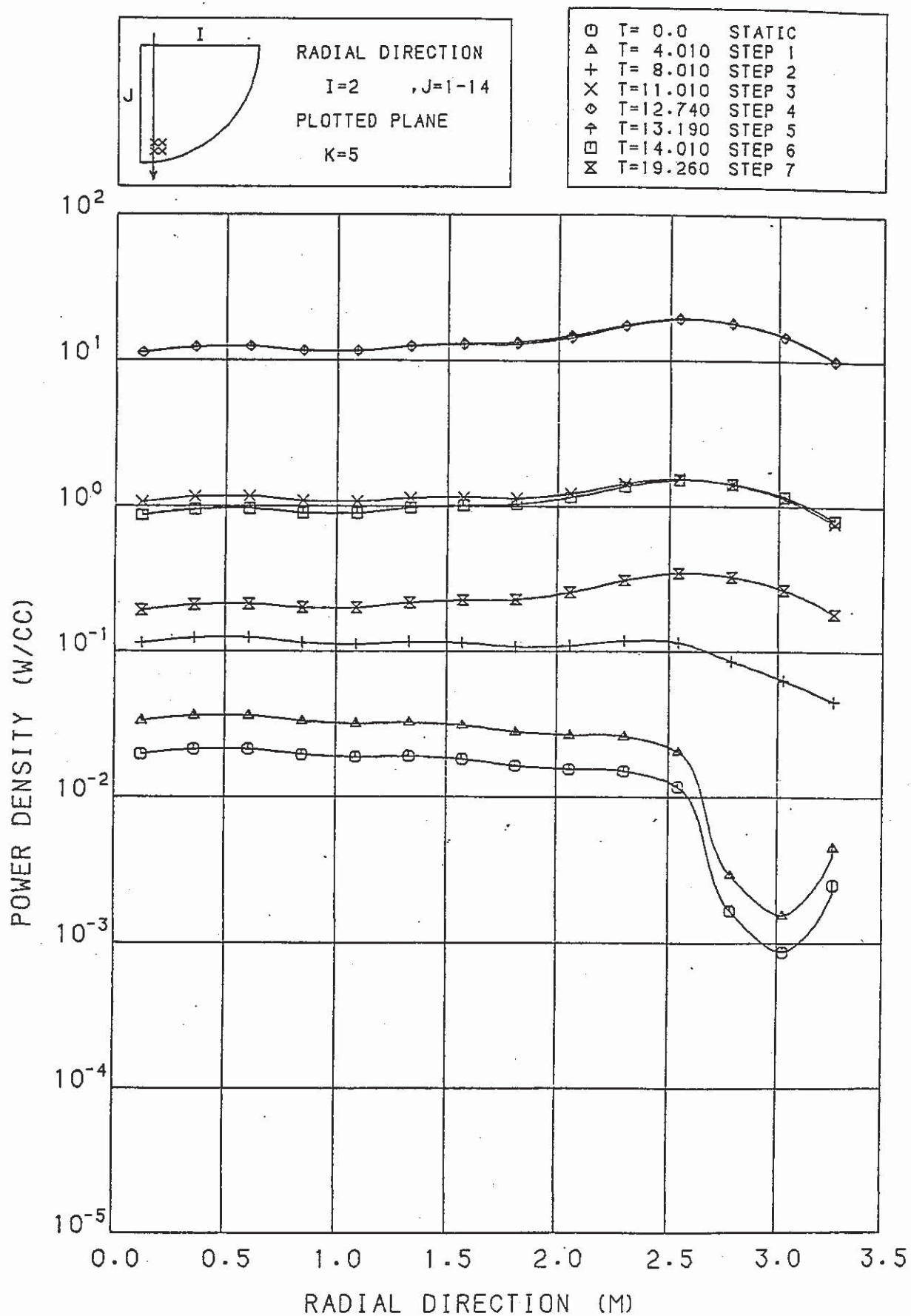
付図7 ケース4：ドップラー増加ケースにおける径方向ボイド率分布（第5平面）



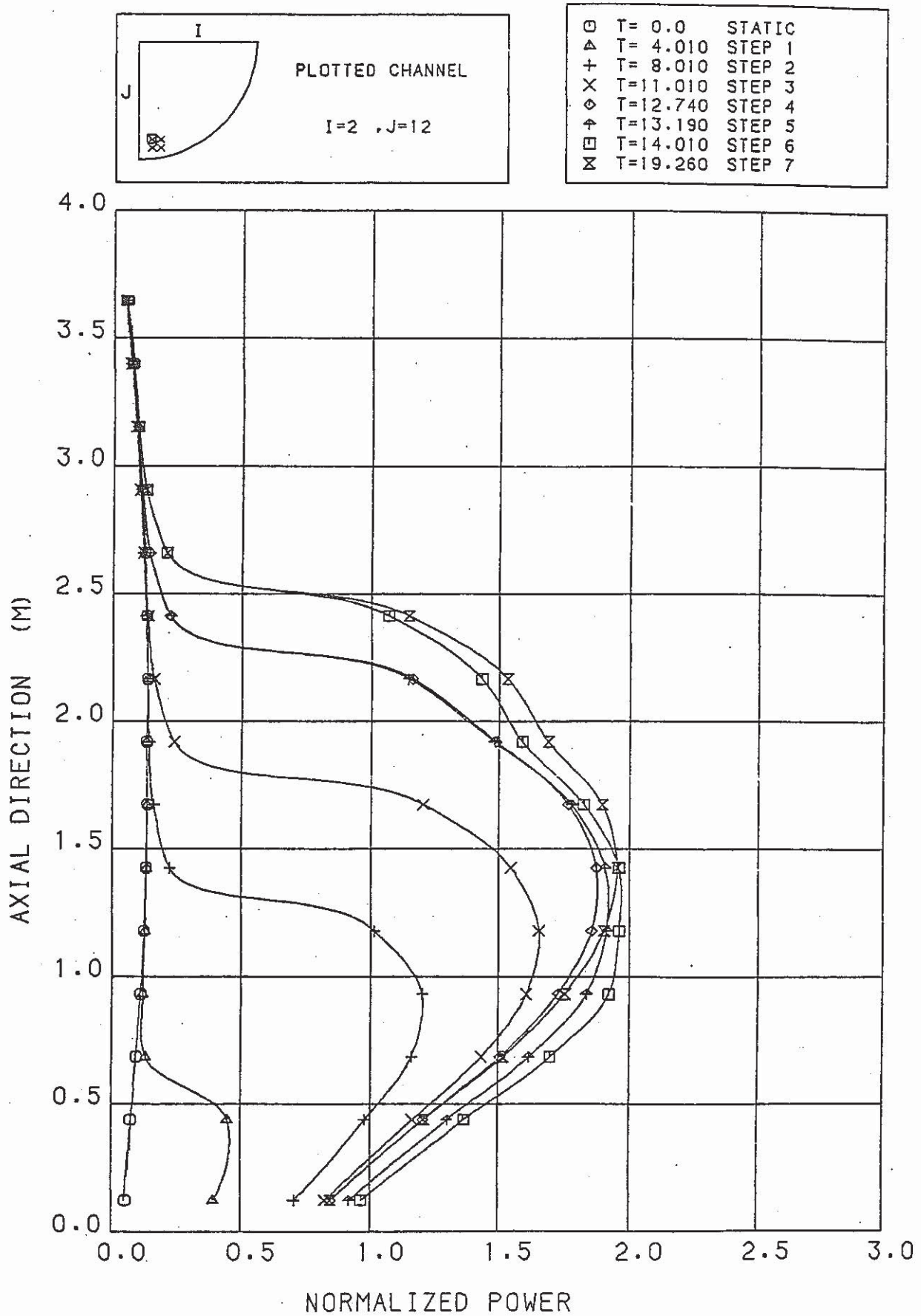
付図8 ケース4: ドップラー増加ケースにおける軸方向ボイド率分布



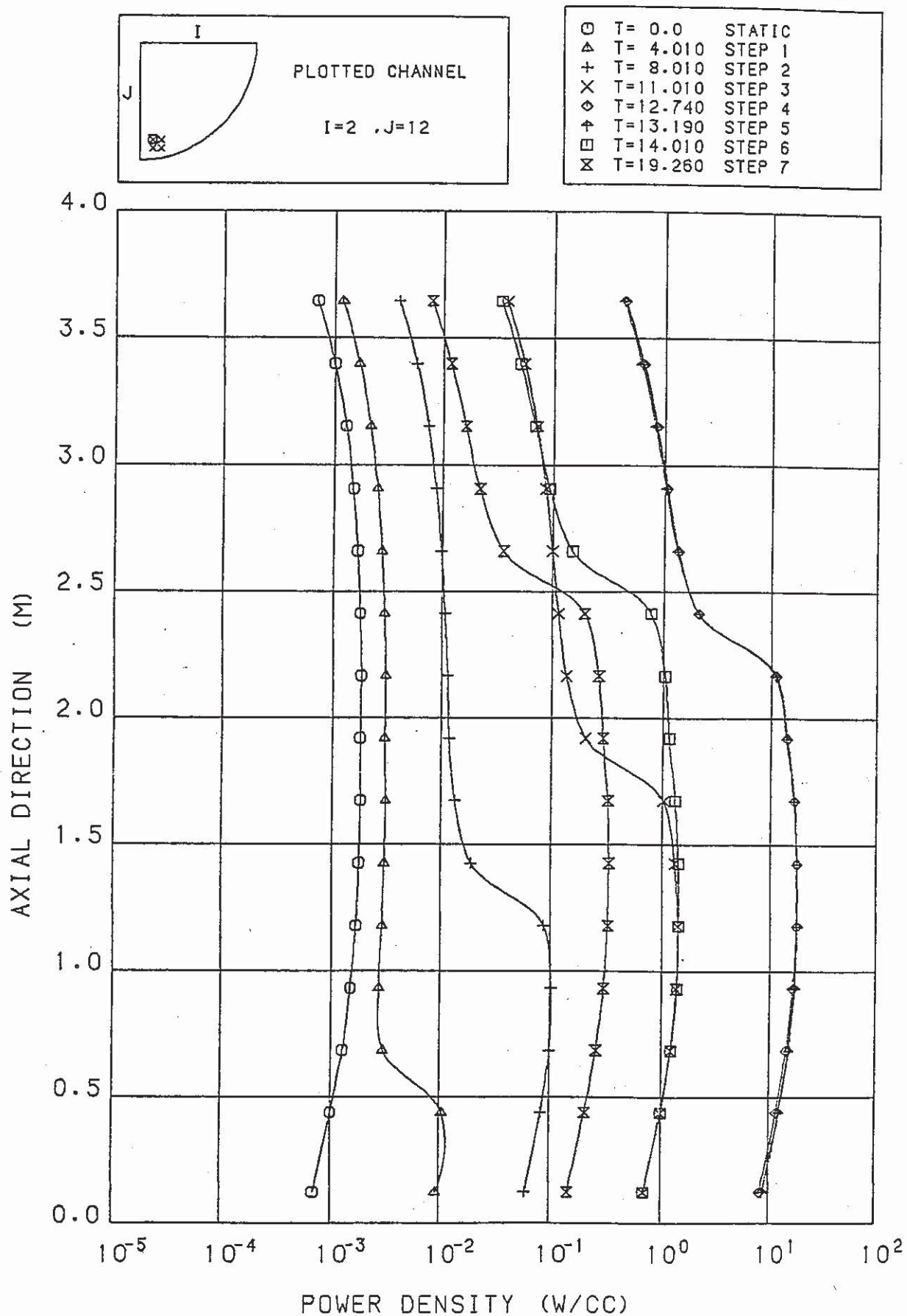
付図9 ケース5: ボイド増加ケースにおける径方向相対出力分布 (第5平面)



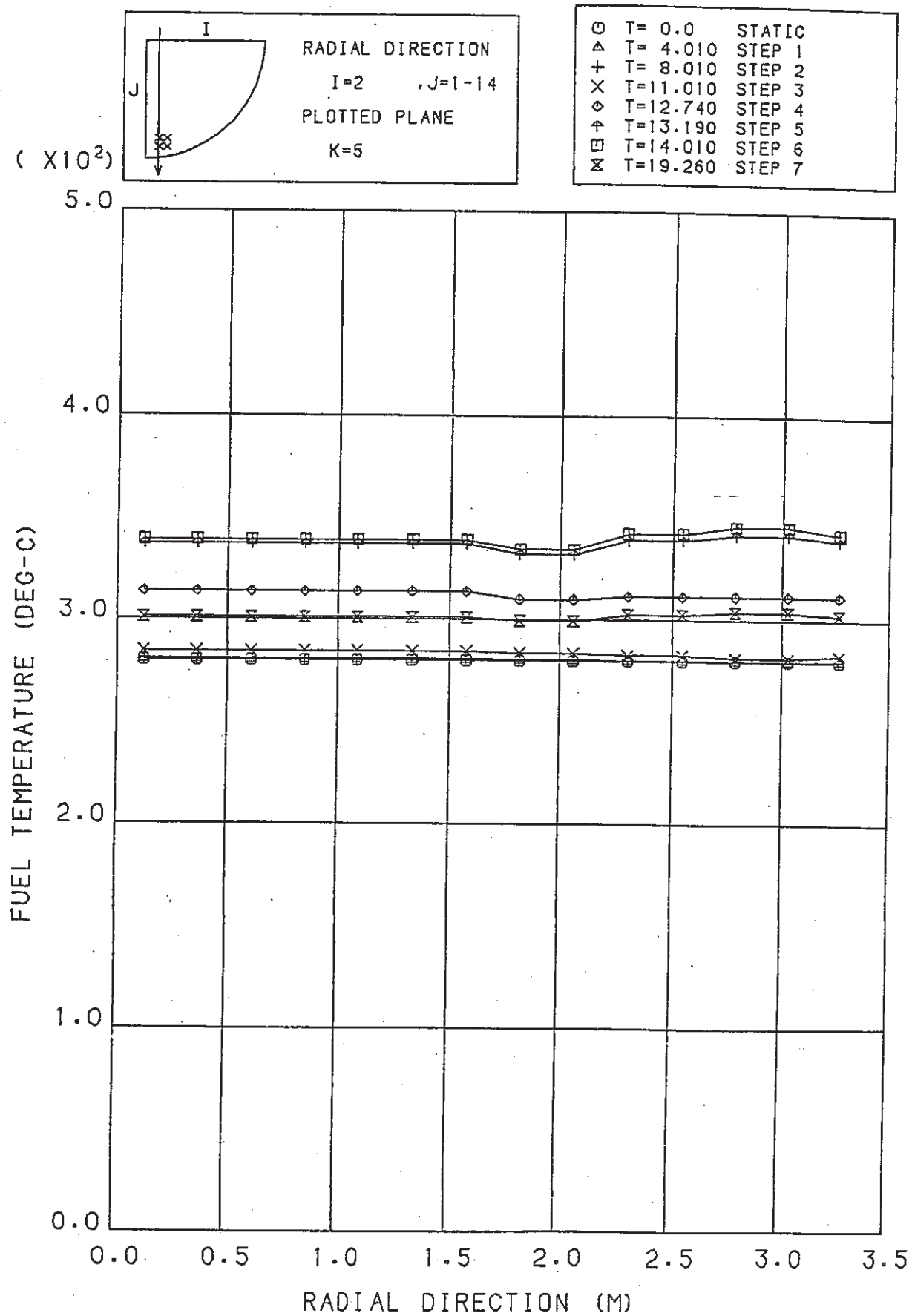
付図10 ケース5: ボイド増加ケースにおける径方向出力密度分布 (第5平面)



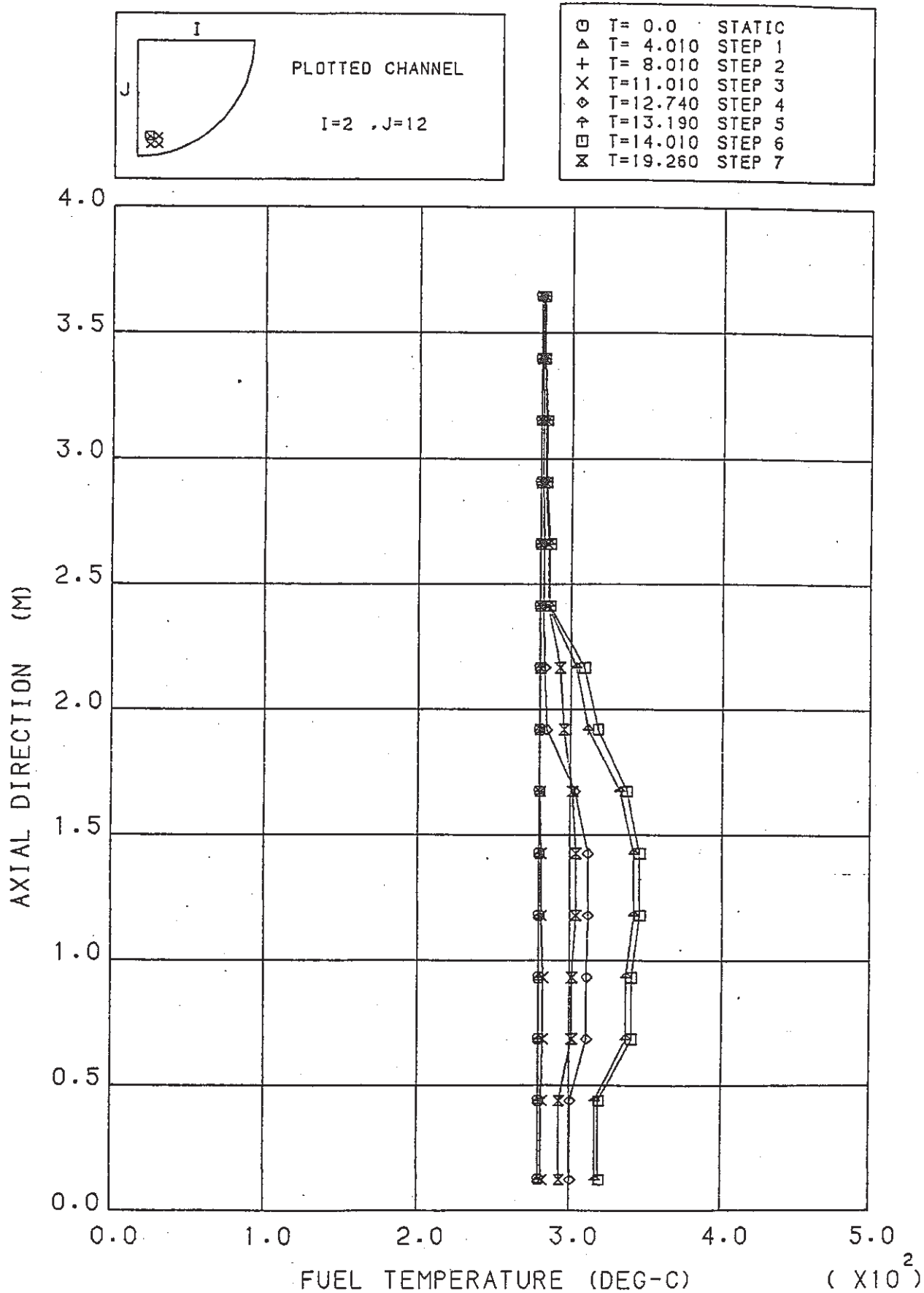
付図 11 ケース 5 : ボイド増加ケースにおける軸方向相対出力分布



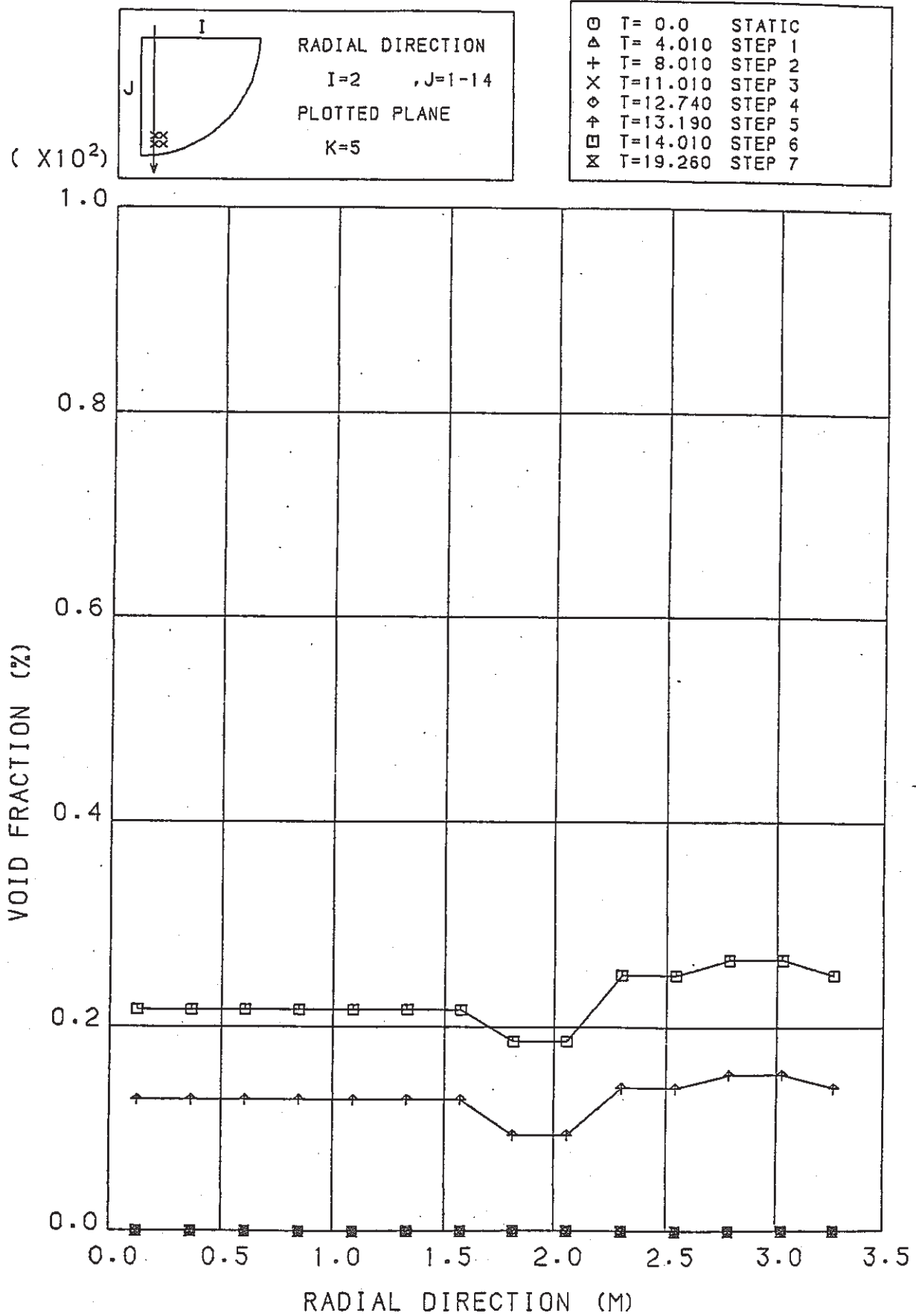
付図12 ケース5: ボイド増加ケースにおける軸方向出力密度分布



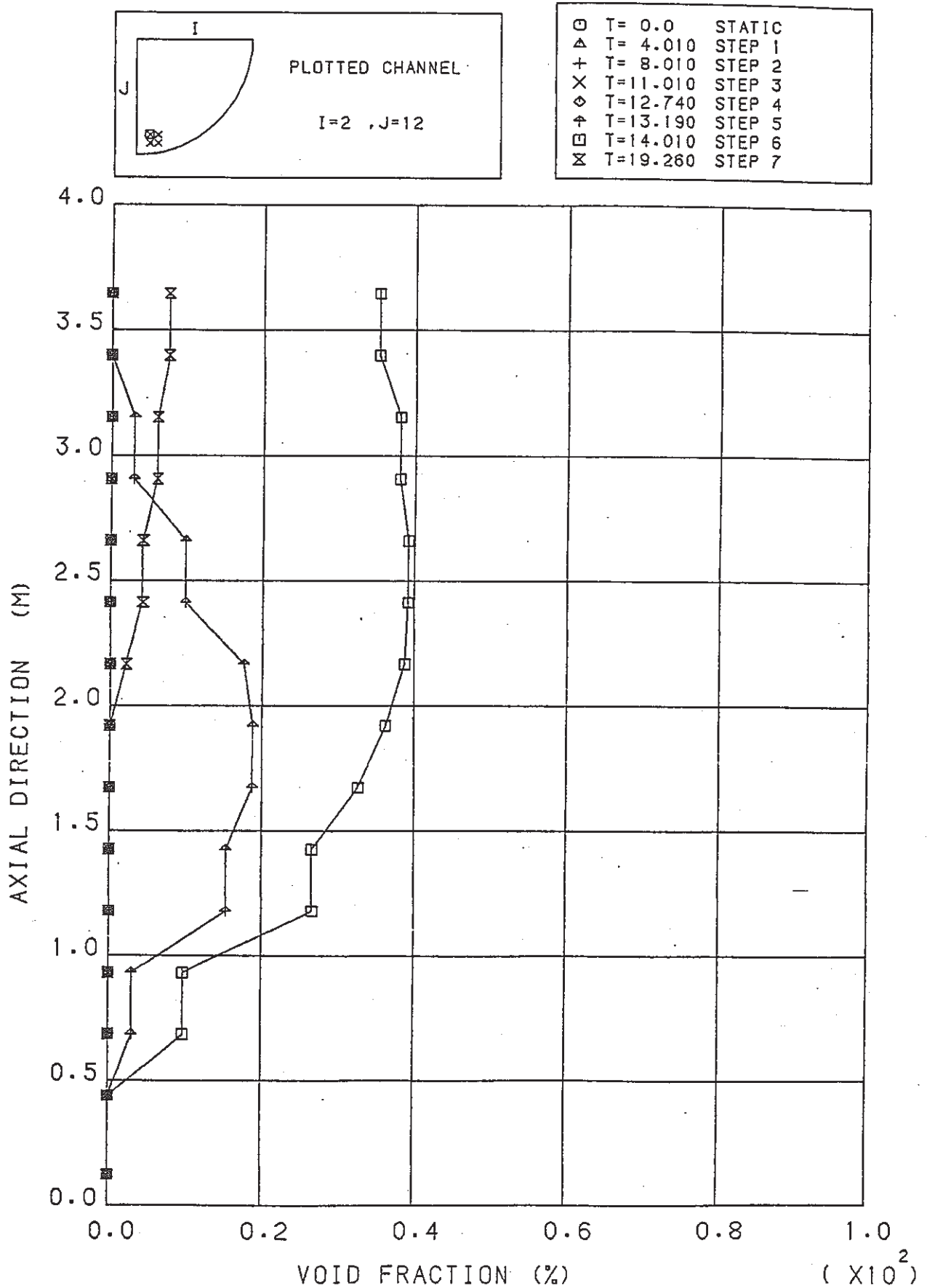
付図13 ケース5: ボイド増加ケースにおける径方向燃料温度分布 (第5平面)



付図 14 ケース 5 : ボイド増加ケースにおける軸方向燃料温度分布



付図 15 ケース 5 : ボイド増加ケースにおける径方向ボイド率分布 (第 5 平面)



付図16 ケース5: ボイド増加ケースにおける軸方向ボイド率分布